

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Daničić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Domagoj Daničić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i uz navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem mentoru Izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se mojim roditeljima i obitelji na strpljenju, razumijevanju i podršci.

Domagoj Daničić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Daničić**

Mat. br.: 0035168267

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ANALIZA ČVRSTOĆE RAZLIČITIH TOPOLOŠKIH KONCEPATA
BRODA ZA KRUŽNA PUTOVANJA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**STRUCTURAL ANALYSIS OF DIFFERENT TOPOLOGY
CONCEPTS OF CRUISE SHIP**

Opis zadatka:

Brodovi za kružna putovanja vrlo su složene brodske konstrukcije i važan proizvod europske brodogradnje. Istraživanje različitih koncepata s novim topološkim rješenjima provode se u cilju unaprjeđenja i poboljšanja kvalitete projekta broda u cjelini. Kako se radi o vrlo velikim i kompliciranim brodskim konstrukcijama potrebno je detaljno razmotriti primarnu čvrstoću broskog trupa kako bi se racionalno ocijenila podobnost predloženog koncepta.

U radu je potrebno predložiti nekoliko različitih topoloških koncepata Panamax broda za kružna putovanja te je za predložene koncepte potrebno provesti:

- a) lokalno dimenzioniranje po Pravilima DNV na razini glavnog rebra,
- b) proračun primarne čvrstoće na razini pojednostavljenog MKE modela cijelog broda.

Pri tom kao prototip koristiti MKE model sličnog broda građen u konvencionalnom sustavu gradnje dostupan na FSB-u. Usporediti odziv (primarna naprezanja, smična naprezanja i deformacije) konstrukcije s predloženim konceptom i onim projektiranim u konvencionalnom sustavu gradnje (prototip). Istražiti senzitivnost utjecajnih topoloških parametara na primarni odziv trupa broda i efektivnost nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda. Kao alat koristiti program MAESTRO dostupan na FSB-u.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

Predviđeni datumi obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	9
2. Koncepti.....	11
2.1. Razlozi razvijanja novih koncepata	11
2.2. Odabrani koncept i usporedba s konvencionalnim konceptom	12
3. Proračun prema pravilima DNV-a[4]	14
4. MKE model [5].....	16
4.1. Izrada MKE modela	16
4.2. Rubni uvjeti [5]	20
4.3. Model opterećenja [5]	21
5. Odabir realne varijante omjera otvora i debljina okolne stijenke bočnih otvora novog koncepta za ispitivanje uzdužne čvrstoće.....	26
5.1. Fransmanova metoda membrane ekvivalentne debljine	26
5.2. Usporedba distribucije naprezanja po visini početnog/osnovnog MKE modela konstrukcije.....	32
5.3. Učinkovitosti paluba nadgrađa.....	39
5.4. Odabir realne kombinacije omjera otvora i debljine stijenke oko oplata.....	42
6. Analiza odziva novog koncepta i prijedlog rješenja.....	44
6.1. Podobnost konstrukcije [5]	44
6.2. Analiza podobnosti prototipne konstrukcije, prijedlog rješenja i podobnost prijedloga rješenja	48
6.3. Analiza naprezanja i učinkovitost nadgrađa predloženog rješenja novog koncepta..	57
6.4. Dimenzioniranje stijenke bočnih otvora	61
7. Usporedba prijedloga rješenja novog koncepta glavnog rebra sa dostupnim modelom tipičnog koncepta glavnog rebra post-Panamax broda	70
8. ZAKLJUČAK.....	76
LITERATURA.....	78

Prilog	79
--------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1. Razvoj suvremenih putničkih brodova za kružna putovanja [1]	9
Slika 2. Razni koncepti	11
Slika 2. Oasis of the Seas	12
Slika 4. Usporedba dvaju topologija glavnih rebara.....	13
Slika 5. Topologija i lokalno opterećenje glavnog rebra razmatranog novog koncepta	15
Slika 6. Prikaz čvorova glavnog rebra MKE modela.....	18
Slika 7. Jedan od modula MKE modela.....	19
Slika 8. Parcijalni ekstrudirani grubi MKE model cijelog broda.....	19
Slika 9. Rubni uvjeti.....	20
Slika 10. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj pregiba - LC1.....	22
Slika 11. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj pregiba - LC1.....	22
Slika 12. Distribucija ukupnih vertikalnih valnih momenata savijanja za LC1 i LC2.....	24
Slika 13. Distribucija ukupnih poprečnih sila duž broda za LC1 i LC2.....	24
Slika 14. Dimenzije otvora i njihov položaj na boku.....	27
Slika 15. Dijagrami za određivanje ekvivalentne debljine membrane za modeliranje oplata boka s otvorima po metodi ekvivalentne smične krutosti [2].....	28
Slika 16. Prikaz finog MKE modela prozora, a) MKE model, b) rubni uvjeti, c) linijsko opterećenje	30
Slika 17. Prikaz MKE model s membranom ekvivalentne debljine, a) MKE model, b) rubni uvjeti, c) linijsko opterećenje.....	31
Slika 18. Deformirani MKE modeli i čvorovi koji su se uspoređivali, lijevo je fini MKE model prozora, desno je MKE model membrane ekvivalentne debljine.....	32
Slika 19. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji CL za slučaj LC1.....	33
Slika 20. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/4 za slučaj LC1.....	34
Slika 21. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/2 za slučaj LC1.....	35
Slika 22. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji CL za slučaj LC2.....	36
Slika 23. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/2 za slučaj LC2.....	37
Slika 24. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/4 za slučaj LC2.....	38
Slika 25. Senzitivnosti ovisnosti učinkovitosti nadgrađa o omjerima otvora.....	40
Slika 26. Senzitivnosti ovisnosti učinkovitosti nadgrađa o debljinama stjenka oplata oko otvora.....	41
Slika 27. Odzivna ploha učinkovitosti.....	41
Slika 28. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela novog koncepta u pregibu –LC1.....	50
Slika 29. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela novog koncepta u progibu-LC2.....	50

Slika 30. Postignuti faktori sigurnosti prototipne konstrukcije novog koncepta u slučaju LC1, lijevo i LC2, desno	51
Slika 31. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1.....	51
Slika 32. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1, pogled na dno.....	52
Slika 33. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC2.....	52
Slika 34. Prikaz pomaka prijedloga rješenja modela novog koncepta u pregibu-LC1.....	53
Slika 35. Prikaz pomaka prijedloga rješenja modela novog koncepta u progibu-LC2.....	54
Slika 36. Postignuti faktori sigurnosti za prijedlog rješenja konstrukcije novog koncepta u slučaju LC1, lijevo i LC2, desno	54
Slika 37. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1.....	55
Slika 38. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1, pogled na dno.....	55
Slika 39. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC2.....	56
Slika 40. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda slučaju opterećenja LC1.....	58
Slika 41. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda slučaju opterećenja LC2.....	59
Slika 42. Prikaz finog MKE modela s pripadnim lokacijama.....	61
Slika 43. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i kritičnih detalja u području 0,5L za slučaj opterećenja LC1.....	63
Slika 44. Prikaz distribucije uzdužnih normalnih naprezanja na području 0,5L konstrukcije u slučaju LC1.....	64
Slika 45. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 12 mm.....	65
Slika 46. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 20 mm.....	66
Slika 47. Prikaz distribucije normalnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 20 mm.....	67
Slika 48. Prikaz distribucije smičnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 20 mm.....	68
Slika 49. Tipična izvedba strukture otvora blizu mjesta koncentracija naprezanja[10].....	69
Slika 50. Izvedbe otvora u proizvodnji.....	69
Slika 51. Prikaz usporedbe distribucije naprezanja dvaju koncepata za LC1.....	71
Slika 52. Prikaz usporedbe distribucije uzdužnih normalnih naprezanja u slučaju LC1 na modelima dvaju koncepata, gore je <i>novi koncept</i> , dolje je konvencionalni koncept.....	72
Slika 53. Prikaz efekta <i>Shear lag</i> , lijevo je konvencionalni koncept, desno je predloženi novi koncept.....	73
Slika 54. Usporedba deformacija, gore je prikazana deformacija predloženog koncepta, dolje je prikazana deformacija konvencionalnog koncepta.....	74
Slika 55. Prikaz usporedbe distribucije debljina dvaju koncepata, lijevo je tipični koncept, desno je novi koncept.....	75

POPIS TABLICA

Tablica 1. Slučajevi opterećenja	23
Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja.....	23
Tablica 3 . Debljine ekvivalentne membrane za debljinu stjenke od 8 mm.....	28
Tablica 4. Rezultati ispitivanja.....	31
Tablica 5. Skupna tablica učinkovitosti za sve varijante.....	40
Tablica 6. Biblioteka kriterija programa MAESTRO i faktori sigurnosti prema DNV.....	45
Tablica 7. Dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [4].....	46
Tablica 8. Tablica s lokacijama oštećenja, prototipnim vrijednostima, tipovima oštećenja, prijedlogom rješenja i postignutim kriterijima.....	49
Tablica 9. Usporedba geometrijskih karakteristika efikasnog i neefikasnog nadgrađa.....	60
Tablica 10. Usporedba momenata otpora inercije i otpora presjeka glavnog rebra.....	60
Tablica 11. Usporedba naprezanja efikasnog i neefikasnog nadgrađa.....	60
Tablica 12. Efikasnosti nadgrađa predloženog rješenja novog koncepta.....	60
Tablica 13. Usporedba stupnjeva učinkovitosti nadgrađa dvaju koncepta.....	73

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
g_0	m/s^2	akceleracija gravitacije
a_v	m/s^2	vertikalna komponenta akceleracije
q	t/m^2	teret na palubama
L	m	duljina broda
B	m	širina broda
V	m	visina broda
T	m	gaz broda
f_l	/	faktor materijala
s	mm	razmak okvira
M_t	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja
M_s	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u progibu
M_h	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u pregibu
I_{zz}	cm^4	moment inercije presjeka
g	/	faktor podobnosti
η_P	mm	udaljenost palube od neutralne linije
η_D	mm	udaljenost dna od neutralne linije
σ_{xD}	N/mm^2	normalna naprezanja u dnu
σ_{xP}	N/mm^2	normalna naprezanja u palubi
σ_x	N/mm^2	normalno naprezanje
t	mm	debljina
W	cm^3	moment otpora
A	mm^2	površina poprečnog presjeka

SAŽETAK

Diplomski rad se bavi usporedbom različitih strukturnih koncepata velikih putničkih brodova za kružna putovanja tokom konceptualne faze projektiranja konstrukcije. Uvodom je dan kratki opis problematike tih brodova te razlog razvijanja novih koncepata.

Za geometriju i topologiju glavnog rebra odabranog koncepta koji će se usporediti s dostupnom konvencionalnom konstrukcijom proveo se proračun prema pravilima DNV (Det Norske Veritas), te se s dobivenim vrijednostima dimenzija strukturnih elemenata izradio MKE model korištenjem programa MAESTRO. Nakon određivanja opterećenja provela se analiza učinkovitosti nadgrađa predložene konstrukcije u ovisnosti o omjeru veličine otvora i debljine oplate. U modelu su se, radi lakšeg i bržeg modeliranja, otvori zamijenili membranom ekvivalentne debljine. Svrha analize je odabir realne kombinacije omjera veličine otvora i debljine oplate. Idući korak je ocjena podobnosti predložene konstrukcije te reprojektiranje u svrhu zadovoljenja podobnosti. Provedena je analiza odziva reprojektirane konstrukcije da bi dobili vrijednosti s kojima uspoređujemo dva koncepta.

Usporedba koncepata provela se analizom odziva modela dviju konstrukcija na razini primarnih naprezanja i deformacija. Za analizu nosivosti stijenke otvora, kod predloženog novog koncepta, izrađen je lokalni fini MKE model prozora kako bi se dobio uvid u detaljnu distribuciju naprezanja oko otvora.

Prilogom su dani nacrti glavnih rebra nakon reprojektiranja i proračun lokalnih strukturnih elemenata prema pravilima DNV, izrađen u programskom paketu MS Excell.

SUMMARY

Diploma thesis deals with comparing different structural concepts of large passenger cruise ships during the conceptual design phase of construction. Introduction gives a brief description of the problems of these vessels and cause of the development of new concepts.

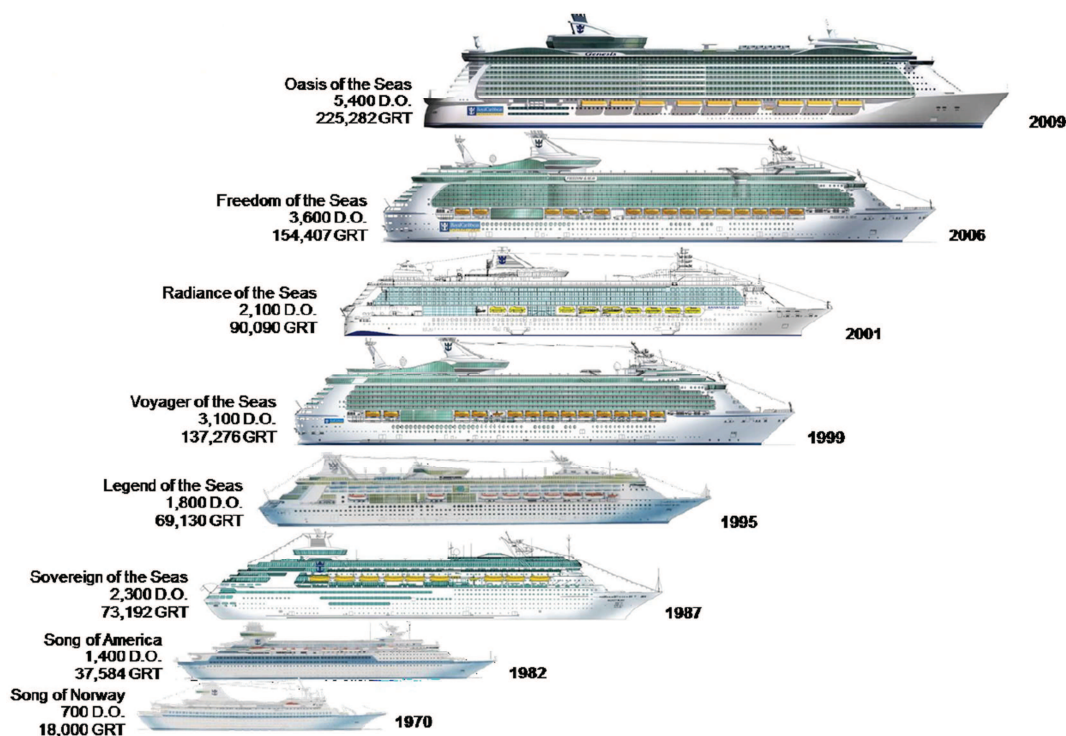
The geometry and topology of the main frames of the selected concept will be compared with available conventional design, calculated according to the rules of DNV (Det Norske Veritas), and with the resulting values of the dimensions of the structural elements. FEM model was created using the program MAESTRO. After determining the structural loads, the analysis of the effectiveness of the proposed construction's superstructure depending on the ratio of openings size and the thickness of plating was carried out. For easier and faster modeling, openings have been replaced with membrane with equivalent thickness in the model. The purpose of the analysis is to select the most realistic combination of openings size and the ratio of the thickness of plating. The next step is the assessment of the fitness of the proposed construction and revision involving changes in order to meet the eligibility. Response analysis was carried out for the redesigned construction to get the values with which we compare two concepts.

Comparison of concepts was conducted by analyzing the responses of two modeled structures considering primary stress and deformations. For the capacity analysis of the openings in the side wall, within the proposed new concept, a local fine FEM model of the openings was created in order to obtain a detailed insight into the stresses distribution around the openings.

Annexes are containing drafts of the main frames after the redesign process and the calculation of local structural elements according to the DNV rules, created in MS Excel software package.

1. UVOD

Koncept kružnih putovanja kakav danas poznamo je začeo početkom 1970ih godina, dok istovremeno dotadašnji koncept transport putnika preko oceanskim putničkim brodovima nestaje. Povećanjem zahtjeva tržišta i zahtjeva brodovlasnika, te razvojem tehnologije, uz promjerne glavnih izmjera otvara se mogućnost razvijanja novih koncepata putničkih brodova, tj. novih topologija/konceptata glavnog rebra. Na razvoj novih koncepata glavnog rebra ponajviše utječu zahtjevi tržišta kao što su zahtjevi za veći broj kabina s pogledom, za što raznovrsniju ponudu zabavnog, rekreacijskog i ostalih sadržaja. Uz dosadašnju složenost konstrukcije zbog povećanja glavnih izmjera, vidi Sliku 1[1], novi koncepti dodatno kompliciraju konstrukciju.



Slika 1. Razvoj suvremenih putničkih brodova za kružna putovanja [1]

Problematika velikih putničkih brodova za kružna putovanja leži u kombinaciji zahtjeva za čvrstoćom i zahtjeva za stabilitetom. Zadovoljenje uzdužne čvrstoće velikih putničkih brodova za kružna putovanja izazovan je i složen posao zbog njihovih konstrukcijskih zahtjeva, visina nadgrađa (visina nadgrađa je često jednaka visini broda [2]), otvorene gornje palube (balkoni, prozori), veliki recesi (diskontinuiteti u strukturi), te prostorije kao što su velike dvorane, kina, kazališta, itd. ...

Radi relativno plitkog gaza te vrste brodova, oko $8 \div 8,5$ m, a zbog njihove visine, javlja se problem kod zahtjeva za stabilitetom točnije kod vertikalnog položaj težišta mase. Kako bi se udovoljilo tim zahtjevima gornje palube moraju biti što lakše tj. što manjih dimenzija, a ako su gornje palube pod velikim vlačnim naprezanjima one se grade od čelika povišene čvrstoće. Ovisno o raznim konceptima, raznim veličinama otvora i oblika recesa utjecaj nadgrađa na uzdužnu čvrstoću broda može varirati, što dalje utječe na kompromis između stabiliteta i zahtjeva za čvrstoćom. Pri projektiranju brod se projektira tako da se tokom plovidbe uvijek nalazi u određenom pregibu (*hogg*) čime se gornje palube opterećuju na vlak, a u slučaju kad brod dođe na valni dol da bude na ravnoj vodnoj liniji, tj. da je ukupni vertikalni moment savijanja i dalje u stanju pregiba ili pak blagog progiba. Kod tankih gornjih paluba uslijed progibnog (*sagg*) globalnog momenta savijanja dolazi do opasnosti od izvijanja konstrukcije.

Ispitivanjem raznih novih koncepata glavnog rebra dolazi se do uvida u razne interakcije trupa i nadgrađa. Prvenstveno se istražuju zbog zahtjeva tržišta, ali takva istraživanja rezultiraju novim konceptima koji imaju određene prednosti nad „klasičnim“ konceptima. Zbog različite distribucije naprezanja i zahtjeva za podobnost drugačijih strukturnih elemenata, struktura ima drugačiji vertikalni položaj težišta mase, drugačije raspodjele debljina i dimenzije strukturnih elemenata, te drugačiju masu konstrukcije u usporedbi s prototipno pretpostavljenim vrijednostima.

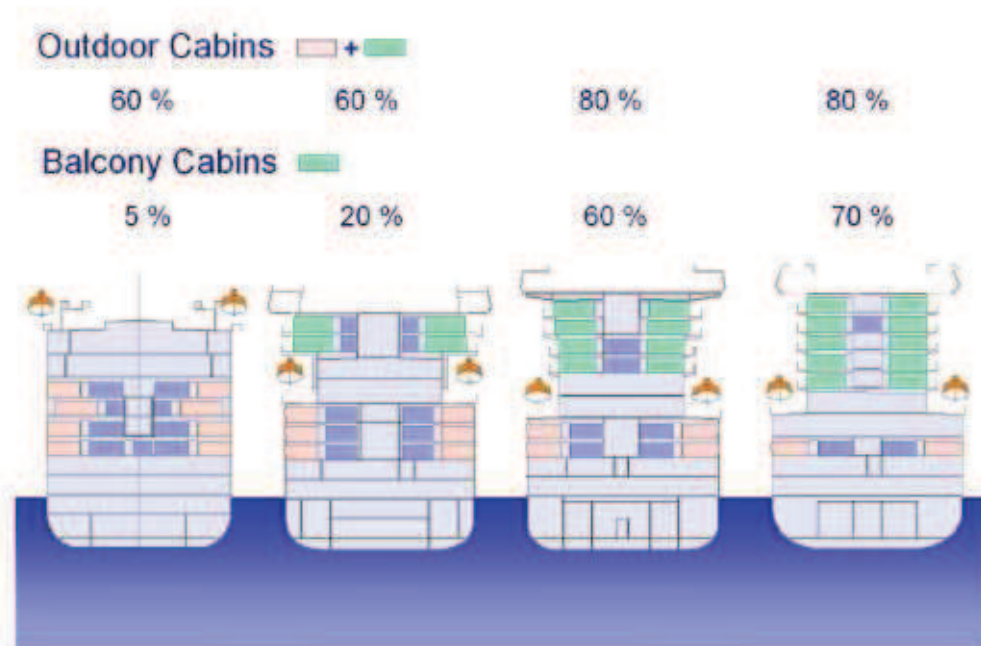
Predloženi novi koncept je proračunat prema pravilima DNV-a, te je izrađen osnovni grubi generički globalni MKE model. Otvori u bokovima su se modelirali *Fransmanovom* metodom ekvivalentne membrane [2], te za razne debljine i omjere otvora se napravila mala studija o učinkovitosti nadgrađa trupa. Pomoću studije je odabran model koji će se reprojektirati i usporediti s prototipnom konstrukcijom. Usporedba se provela tako da se reprojektiranom novom konceptu ispitala uzdužna čvrstoća te su rezultati uspoređeni s rezultatima ispitivanja uzdužne čvrstoće prototipne konstrukcije.

Metoda ispitivanja uzdužne čvrstoće unutar 0.4L broda je usporedba rezultata klasične teorije grede [2], gdje se brodski trup idealizira gredom složenog presjeka i daje prihvatljive rezultate za jednopalubne brodove (tankeri, brodovi za rasuti teret...) s rezultatima dobivenim metodom konačnih elemenata u programu MAESTRO polovinskog simetričnog MKE modela pretpostavljenog samo kao ekstrudirano glavno rebro zadane geometrije.

2. Koncepti

2.1. Razlozi razvijanja novih koncepata

Kao što je rečeno u uvodu, zahtjevi tržišta i brodovlasnika imaju veliki utjecaj prilikom projektiranja velikih putničkih brodova za kružna putovanja. Neki od zahtjeva koji utječu na projektiranje je što veća ponuda soba s pogledom, što raznovrsnija ponuda razonode, veći kapacitet soba, luksuz... Pored standardne prakse povećavanja glavnih izmjera (duljine, širine, gaza i visine) tih brodova, kojima se povećavao kapacitet putnika i raznolikost ponude, počelo se razmišljati o novim konceptima. Promjena oblika glavnog rebra tj. promjena njegove topologije, rezultira povećanjem broja soba s balkonom, što je i jedan od ciljeva razvoja novih koncepata, vidi Sliku 2.[3].



Slika 2. Razni koncepti

Svaki novi koncept za sobom povlači niz novih izazova i projektnih rješenja samo tokom početne faze projektiranja, u kojoj je dovoljno samo zadovoljiti zahtjev primarne čvrstoće. U radu je razmatrano nekoliko koncepata tj. topologija glavnog rebra, od kojih je, zbog nedostatka vremena i opsega rada, odabran samo jedan. Odabran je koncept koji je, topologijom glavnog rebra, konstrukcijski najzanimljiviji i najzahtjevniji.

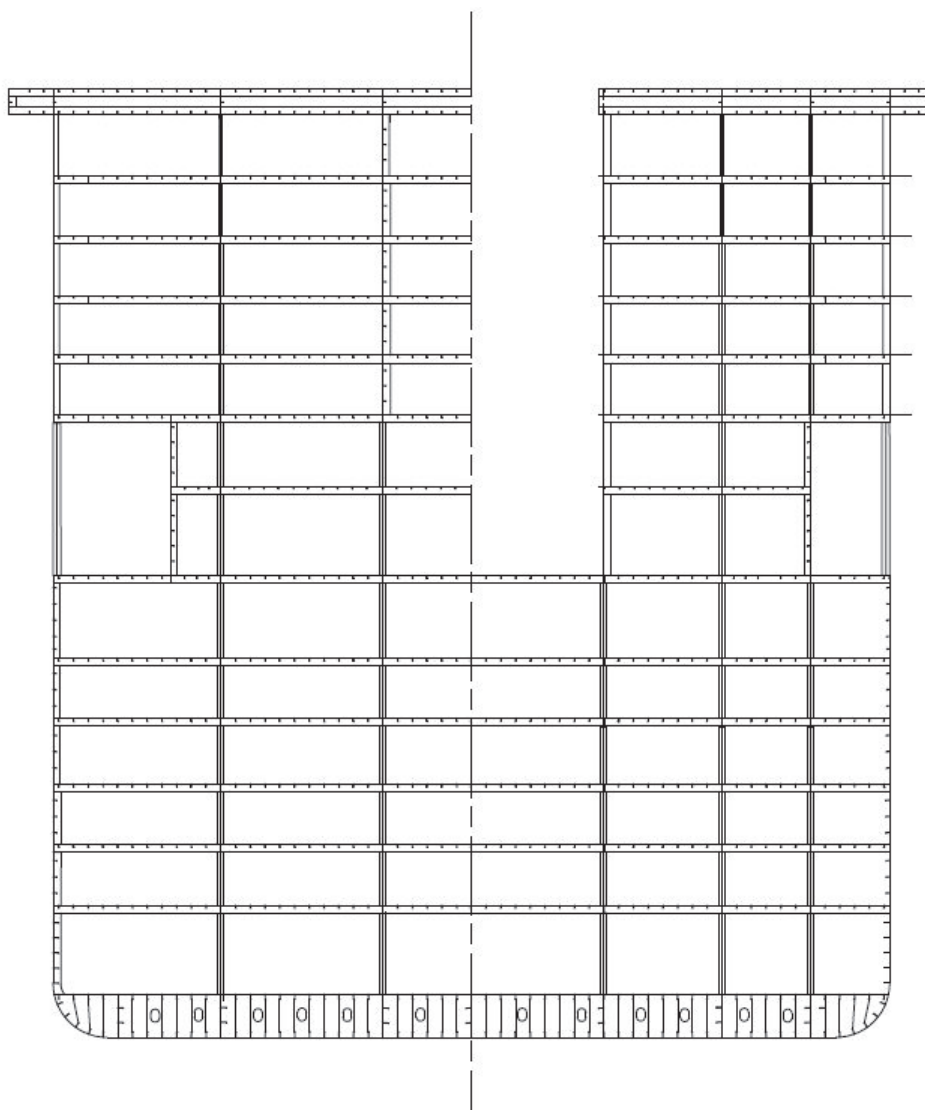
2.2. Odabrani koncept i usporedba s konvencionalnim konceptom

Odabrani koncept topologijom glavnog rebra je sličan onom primijenjen na brodu *Oasis of the Seas* najvećem do sada izgrađenom brodu za kružna putovanja na svijetu. Topologija glavnog rebra tog broda podsjeća na dva tornja koja su smještena na široki trup broda, gdje su vanjske stranice tornjeva ujedno i bok, a između tornjeva je prazan prostor koji se može iskoristiti na razne načine kao atraktivni javni prostor (šetnica, trg, glavna ulica s restoranima, lokalima, itd.). Na taj način unutarnje kabine jako dobivaju na vrijednosti što nakraju rezultira većom cijenom najma takvih kabina. Neke od slika *Oasis of the Seas* i takvog „novog“ koncepta prikazane su na Slici 3.



Slika 3. Oasis of the Seas

Da bi usporedba konstrukcije novog koncepta s prototipnom konstrukcijom bila što bolja glavne izmjere broda su ostale iste. Prilikom projektiranja topologije glavnog rebra pazilo se na veličine soba, te na njihov razmještaj kako bi se odredio raspored primarnih strukturnih elemenata. Prototipna topologija glavnog rebra je tipična topologija glavnog rebra jednog *post-Panamax* putničkog broda za kružna putovanja. Usporedba dvaju glavnih rebara je dana na Slici 4, gdje je lijevo prikazana prototipna topologija, tipični koncept, a desno je prikazana odabrana topologija, novi koncept.



Slika 4. Usporedba dvaju topologija glavnih rebara

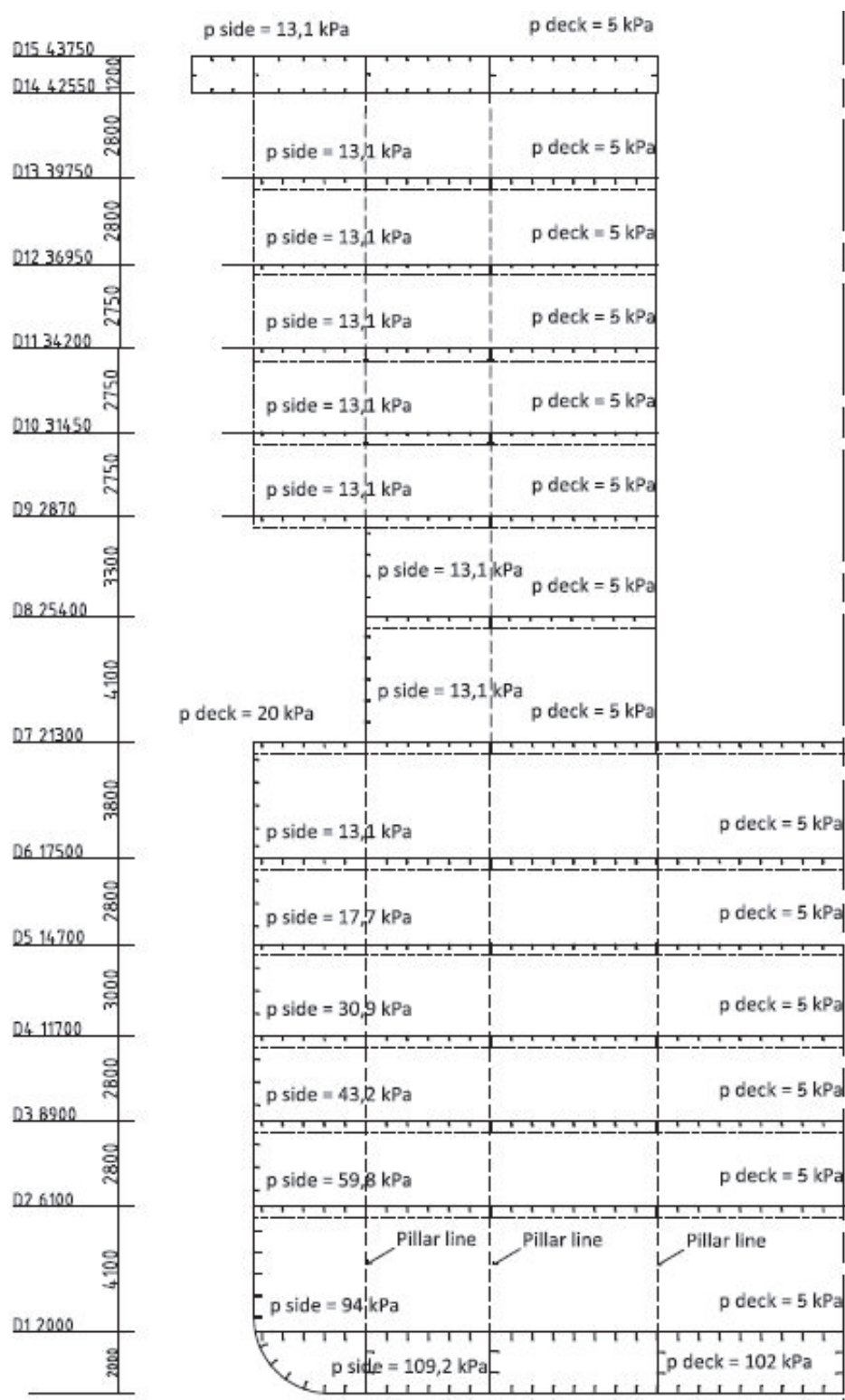
3. Proračun prema pravilima DNV-a[4]

Prema geometriji i topologiji glavnog rebra novog koncepta, unutar okvira prototipnih glavnih izmjera, proračunali su se elementi uzdužne i poprečne čvrstoće. Dimenzionirane su debljine oplata dna, dvodna, boka i paluba, uzdužno jaki nosači, podveze paluba, ukrepe te poprečni okviri boka i paluba, te koljena i upore.

Glavne dimenzije broda i statički momenti savijanja su:

Duljina:	273 m
Širina:	38,6 m
Visina:	43,75 m
Gaz:	7,07 m
Razmak okvira:	2730 mm
Koeficijent punoće:	0,6
Ukupni moment savijanja u pregibu:	8 400 000 kNm
Ukupni moment savijanja u progibu:	-4 400 000 kNm

Konceptualni nacrt prema kojem se proračun izveo dan je Slikom 4. Pošto u novom konceptu nisu mijenjane glavne izmjere, niti raspored i razmak paluba po visini, već postojeći tlakovi proračunati u prototipnoj konstrukciji su preuzeti. Tlakovi su vidljivi na konceptualnom nacrtu koji je dan Slikom 5. Proračun strukturnih elemenata glavnog rebra proveden je s obzirom na zahtjeve lokalne čvrstoće prema pravilima *DNV-Hull structure Design, Part 3, Ch.1., July 2011*, te je prikazan u prilogu A.



Slika 5. Topologija i lokalno opterećenje glavnog rebra razmatranog novog koncepta

4. MKE model [5]

MKE model je izrađen u svrhu direktnog proračuna strukture metodom konačnih elemenata (MKE) pomoću čega dobivamo odgovor da li konstrukcija zadovoljava zahtjeve za čvrstoćom. U proračunu prema Pravilima DNV [4] dobivaju se vrijednosti za izolirana opterećenja, dok proračun metodom konačnih elemenata uzima u obzir interakciju elemenata i naprezanja koja su im narinuta. Polovični 3D MKE model je izrađen u programu MAESTRO [6], te je simetričan oko YX ravnine u MAESTRO [6] koordinatnom sustavu. Polovični modeli, ako se dobro izrade i s pravilno zadanim rubnim uvjetima, daju rezultate zadovoljavajuće točnosti u usporedbi s potpunim 3D MKE modelima [6].

4.1. Izrada MKE modela

Koordinatni sustav programa MAESTRO [6] definiran je na idući način:

- ishodište koordinatnog sustava definirano je u sjecištu centralne ravnine i osnovice;
- globalna os X definirana je u smjeru uzdužne ravnine broda i pozitivna je prema naprijed;
- globalna os Z definirana je u poprečnom smislu i pozitivna je prema desno od osi X;
- globalna os Y je definirana u vertikalnom smjeru, okomita je na XZ ravninu, prolazi kroz sjecište osi X i osi Z te je pozitivna prema gore.

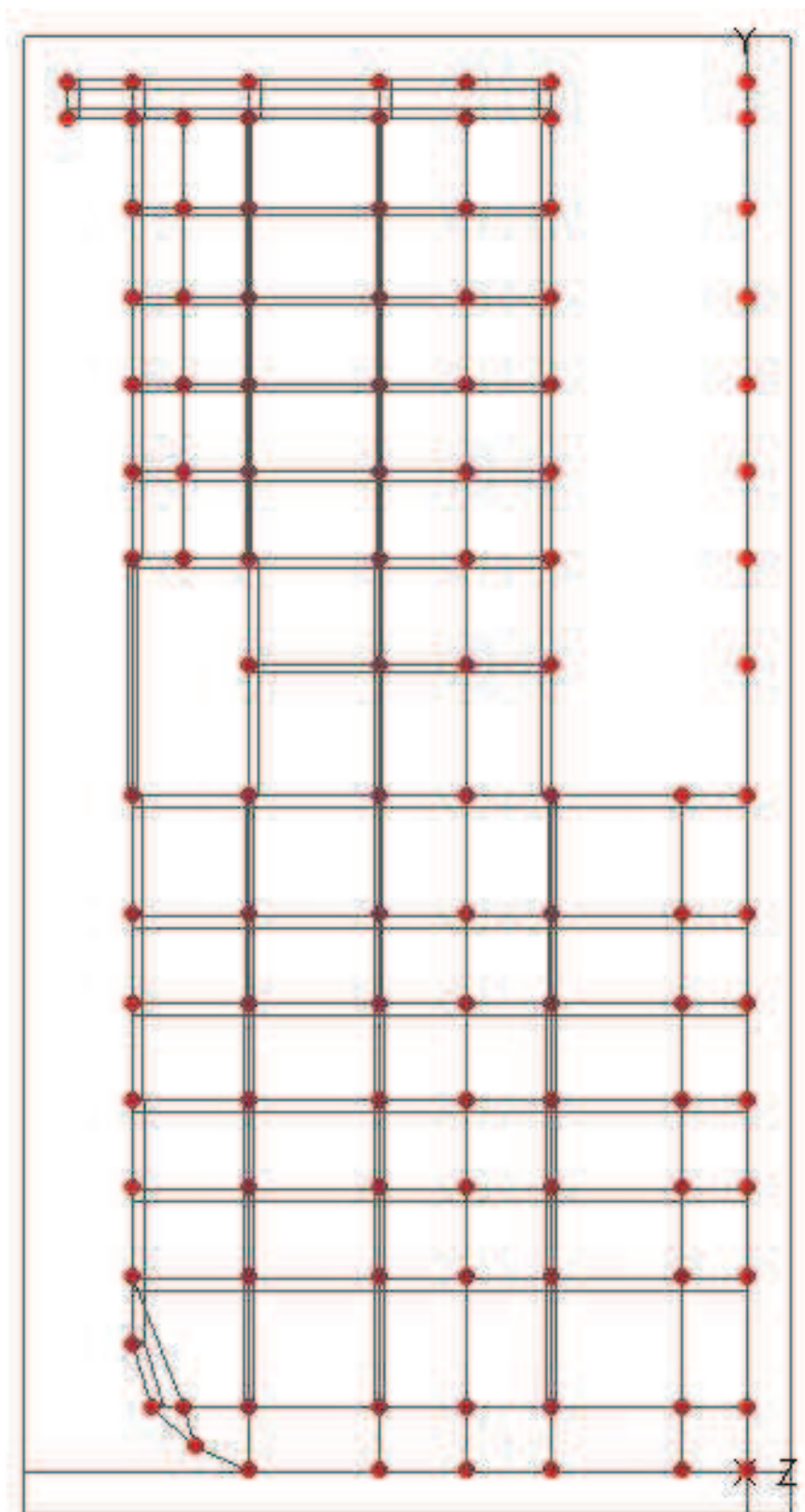
Model konstrukcije novog koncepta se izradio preuređivanjem modela prototipne konstrukcije. Izrada modela prototipne konstrukcije tekla je u nekoliko koraka, prvi korak je definiranje čvorova glavnog rebra u prostoru pomoću prostornih koordinata (x,y,z) s obzirom na prethodno objašnjenu definiciju koordinatnog sustava [6]. Čvorovi se postavljaju na mjesta spajanja konačnih elemente te se dobiva model glavnog rebra. Za model konstrukcije novog koncepta postojeći model se preuredio. Brisao se višak vojeva, dodavani su novi čvorovi i vojevi dok se ostatak lokalno preuredio, tj. mijenjane su pozicije određenih čvorova i svojstva vojeva.

Otvori u bokovima na gornjim palubama u modelu su se modelirali tzv. *Fransmanovom* metodom ekvivalentne membrane [2]. Prema dimenzijama strukturnih elemenata dobivenih iz proračuna po DNV-u se izradio parcijalni model cijelog broda na razini grube mreže, bez promjene forme, ekstrudirajući glavno rebro.

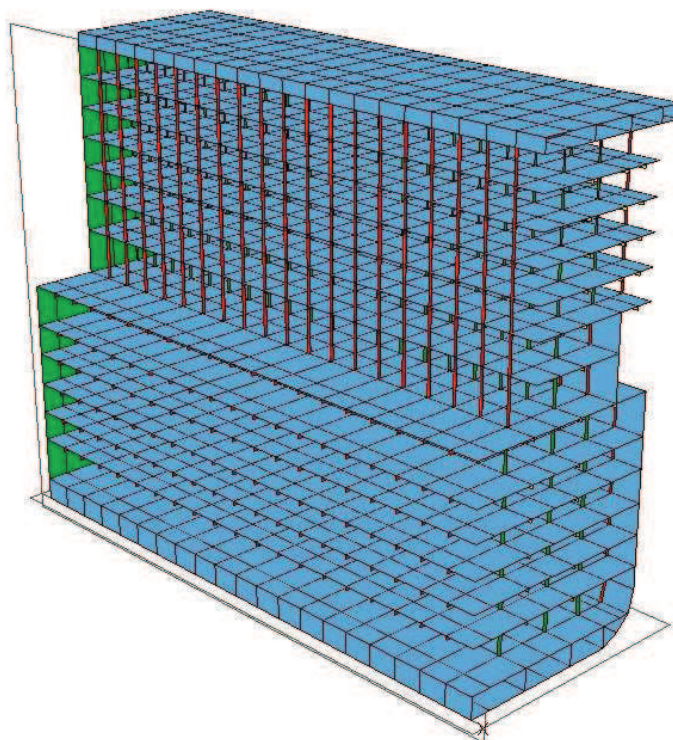
Model se izradio slijedećim postupkom:

- brisanje viška prethodno definiranih vojeva;
- postavljanje dodatnih i premještanje dijela postojećih čvorova u prostoru, Slika 6;
- povezivanje odgovarajućih čvorova konačnim elementima u vidu vojeva na kojima su definirana svojstva materijala, paneli, ukrepe, sponje, podveze, upore, rebrenice i pregrade, Slika 7;
- tako dobiveno glavno rebro se ekstrudiralo do duljine od 20 razmaka rebara te se dobio modul, Slika 7;
- spajanjem 5 takvih modula je dobiven cijeli model, Slika 8.

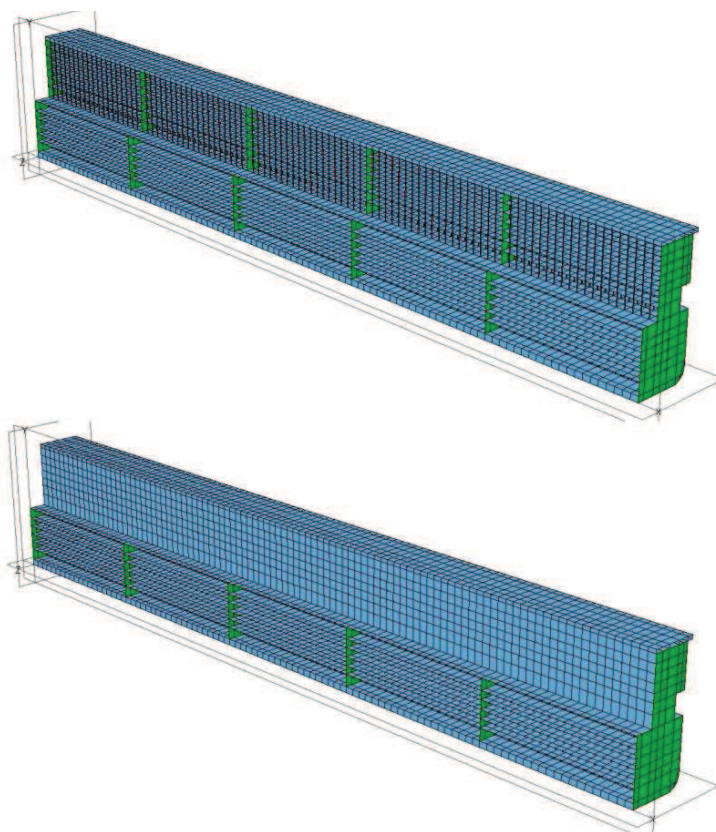
Orebreni paneli, pregrade i rebrenice su modelirani ukrepljenim četverokutnim pločastim makroelementima, dok su rebrenice, podveze i sponje modelirani kao gredni elementi, detaljnije u [7]. Pomoću tako definiranih elemenata omogućeno je brzo i lako modeliranje različitih projektnih formi broda ili njihovih djelomičnih modela, te zbog potreba brojnih iteracija (raznih optimizacija projekta) njihova svojstva je moguće brzo mijenjati. Naprezanja uslijed opterećenja jakih nosača na tlak i na vlak se mjere u 1 točki na $L/2$. Također se brzo dobivaju odgovori o podobnosti konstrukcije u vidu broja zadovoljenih sigurnosnih kriterija.



Slika 6. Prikaz čvorova glavnog rebra MKE modela



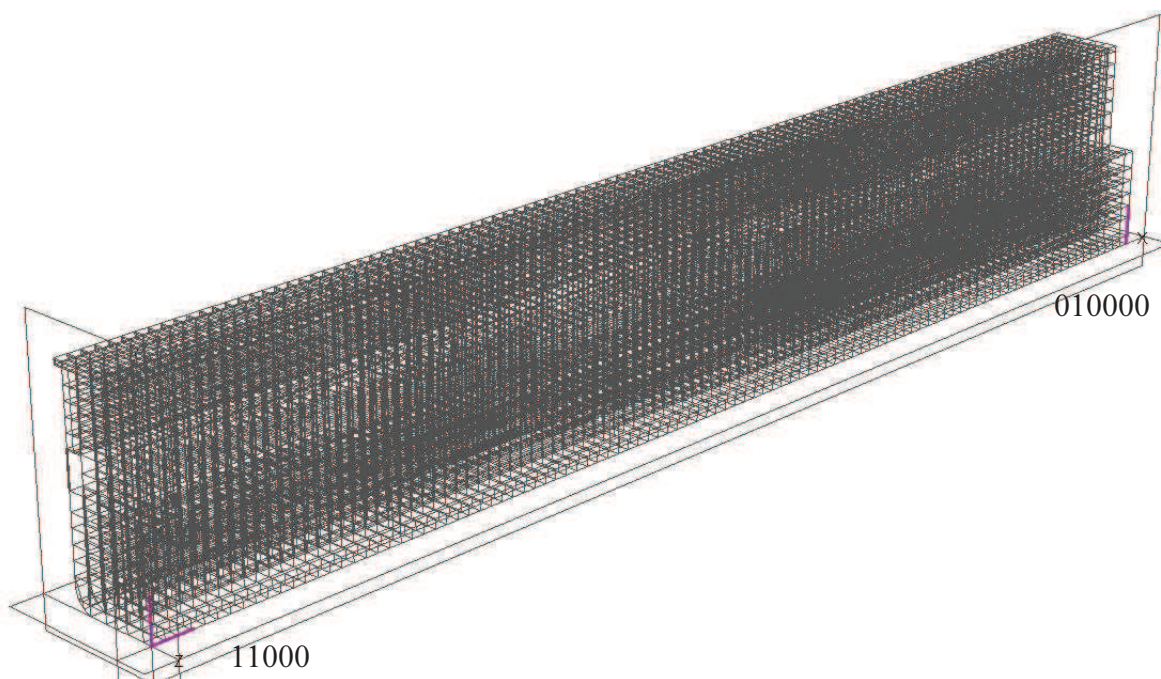
Slika 7. Jedan od modula MKE modela



Slika 8. Parcijalni ekstrudirani grubi MKE model cijelog broda

4.2. Rubni uvjeti [5]

Kod ovakvih modela broj rubnih uvjeta je minimalan, što znači sprječavanje kretanja konstrukcije koji nisu dijelom razmatranog problema, a u ovo slučaju to je pomak modela kao krutog tijela. Definiraju se u osloncima preko pomaka, sila ili kombinacijom navedenog. Oslonci su postavljeni na jake poprečne strukture (poprečne pregrade), da bi moguće sile reakcija na oslonce imale što manji utjecaj na proračun. Rubni uvjeti su propisane vrijednosti translacijskih i rotacijskih pomaka, te su u programu [6] te vrijednosti definirane kao 0-slobodno i 1-spriječeno. Zapis pomaka je šifriran te prve tri znamenke označuju translacijske pomake u smjeru osi X, Y i Z, dok druge tri znamenke označuju rotacijske pomake oko navedenih osi. Pomaci u smjeru osi Z i rotacije oko osi X i osi Y kod polovičnog simetričnog modela su automatski spriječeni od strane programa (001110) [5].



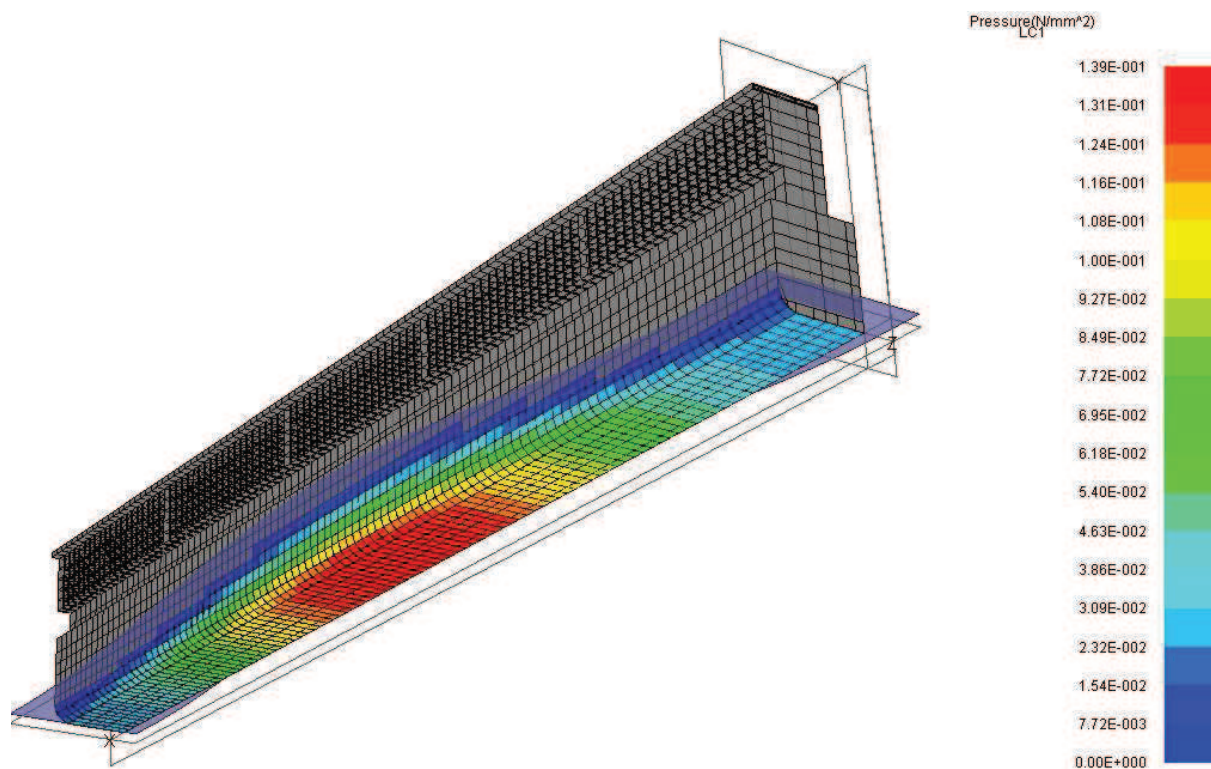
Slika 9. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su implementirani na početnom rubu modela i na krajnjem rubu modela (vidi Sliku 9).

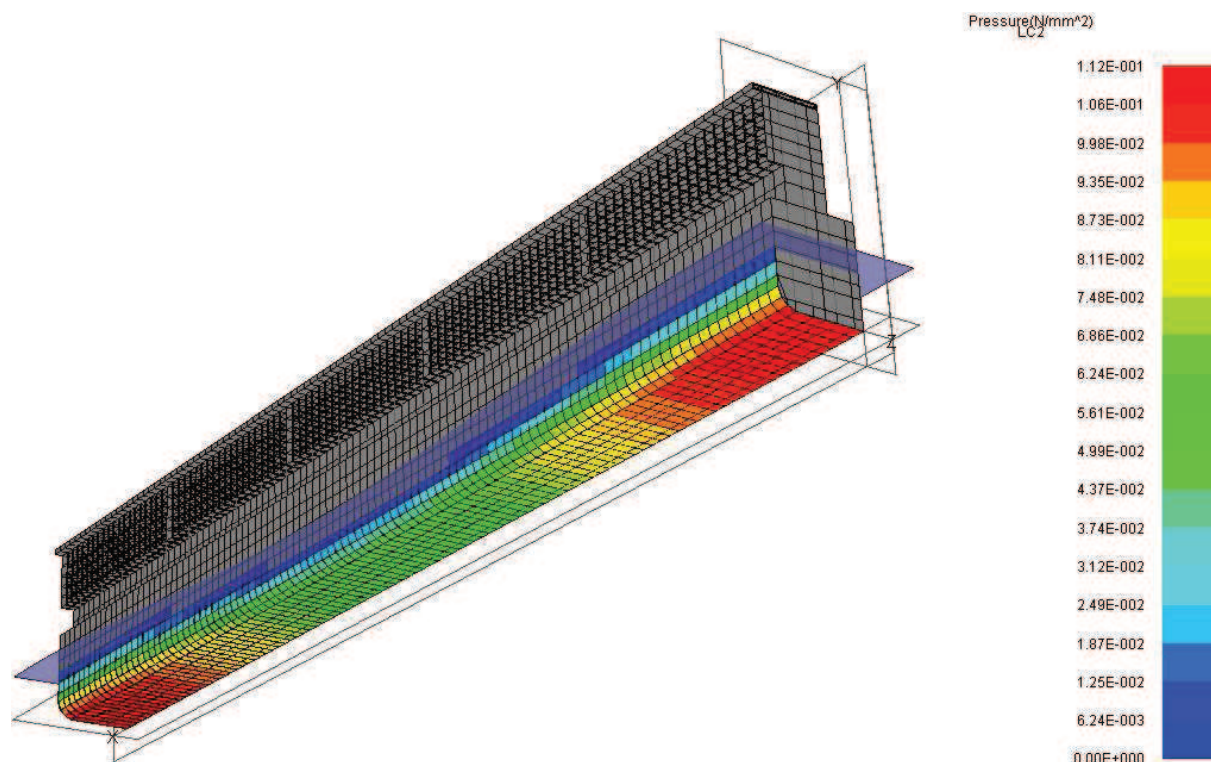
4.3. Model opterećenja [5]

Forma razmatranog broda je fina forma sa blok koeficijentom oko $C_B = 0,6$ i ima relativno kontinuiran raspored vlastite težine i tereta (na kretanje putnika po brodu i palubama se ne može puno utjecati). To rezultira da je brod na mirnoj vodi u stanju pregiba tj. da ima višak težine na krajevima, a višak uzgona na sredini. Uslijed takve distribucije statičkog opterećenja, dobiveni statički momenti pregiba su vrlo visoki. Kombinacija maksimalnog statičkog (na mirnoj vodi) pregibnog momenta savijanja i maksimalnog valnog pregibnog momenta za rezultat daje najveća moguća uzdužna naprezanja. Suprotno tome kombinacija maksimalnog valnog progibnog momenta i minimalnog statičkog (na mirnoj vodi) pregibnog momenta savijanja daje mogućnost pojave tlačnih naprezanja na gornjim palubama. Dovođenje broda u takvo stanje se po svaku cijenu izbjegava jer tlačna naprezanja u gornjim palubama nadgrađa, koje su izrađene od tankih limova, mogu dovesti do izvijanja konstrukcije. Iz tog razloga promatrani brod se projektira tako da u najnepovoljnijoj kombinaciji momenata bude u pregibu ili u minimalnom progibu[5].

Zbog forme modela (ekstrudirani model izgleda poput grede, vidi Sliku 8.) koja nema izmodeliranu krmu i pramac, maksimalni momenti pregiba i progiba su simulirani pomoću sinusoidalnog vala kojemu se mijenjanjem faze dobivao valni brijeg ili valni dol. Da bi se postigao maksimalni pregibni moment modelu je narinut val kojemu se valni brijeg nalazi na polovici modela, a valni dolovi se nalaze na krajevima modela, Slika 10. Tako se uspio dobiti predloškom zahtijevani maksimalni moment u pregibu. Za postizanje maksimalnog progibnog momenta zadanog u zadatku, modelu narinuti val sad ima valne brjegovе na početku i na kraju modela, a valni dol se nalazi na polovici modela, Slika 11. Vlastitu težinu modela program sam računa te je implementira kao silu u čvorovima. Slučajevi opterećenja su napravljeni u skladu sa Pravilima DNV-a za direktne kalkulacije [8], [5].



Slika 10. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj pregiba - LC1



Slika 11. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj progiba – LC2

Tablica 1. Slučajevi opterećenja

SLUČAJ OPTEREĆENJA	KRATKI OPIS
LC1	Maksimalni pregibni moment + puno opterećenje po palubama
LC2	Maksimalni progibni moment + puno opterećenje po palubama

Za direktni proračun metodom konačnih elemenata ukupni vertikalni moment savijanja za progib i pregib se računa po Pravilima DNV [4] prema izrazu:

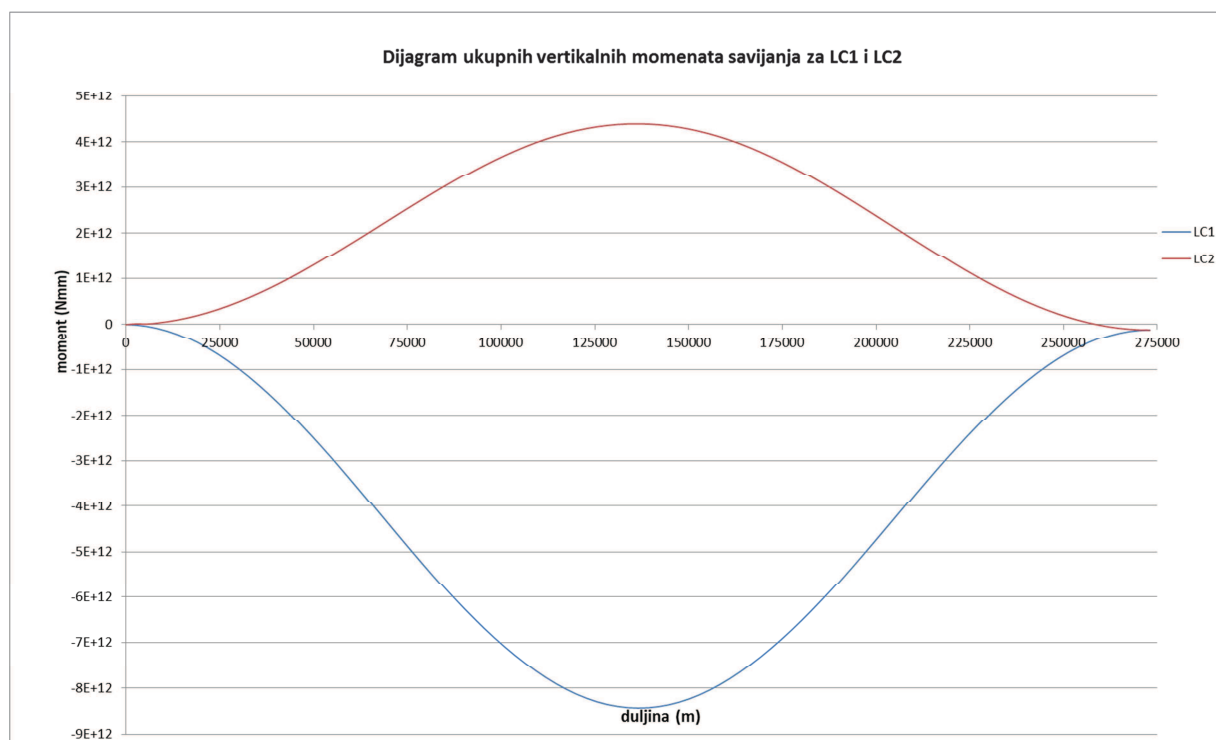
$$M_t = M_S + M_W \quad [\text{Nm}] \quad (4.1)$$

Proračun valnih momenata dan je u prilogu A. Prikaz komponenti vertikalnih momenata savijanja postignutog u proračunu, zadanih i postignutih dan je Tablicom 2

Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja

Slučaj opterećenja	Slučaj krcanja	M_t prema DNV [kNm]	M_t korišten prema predlošku [kNm]	M_t MAESTRO postignuti [kNm]
LC1	Maks. Pregib	7 847 383	8 400 000	8 409 220
LC2	Maks. Progib	-4 932 641	-4 400 000	- 4 403180

Vertikalni momenti savijanja korišteni u proračunu su vertikalni momenti prema predlošku. Dijagram ukupnih vertikalnih momenata savijanja za oba slučaja opterećenja (LC1 i LC2) prikazan je na Slici 12, dok je dijagram ukupnih vertikalnih poprečnih sila za oba slučaja opterećenja dan Slikom 13.

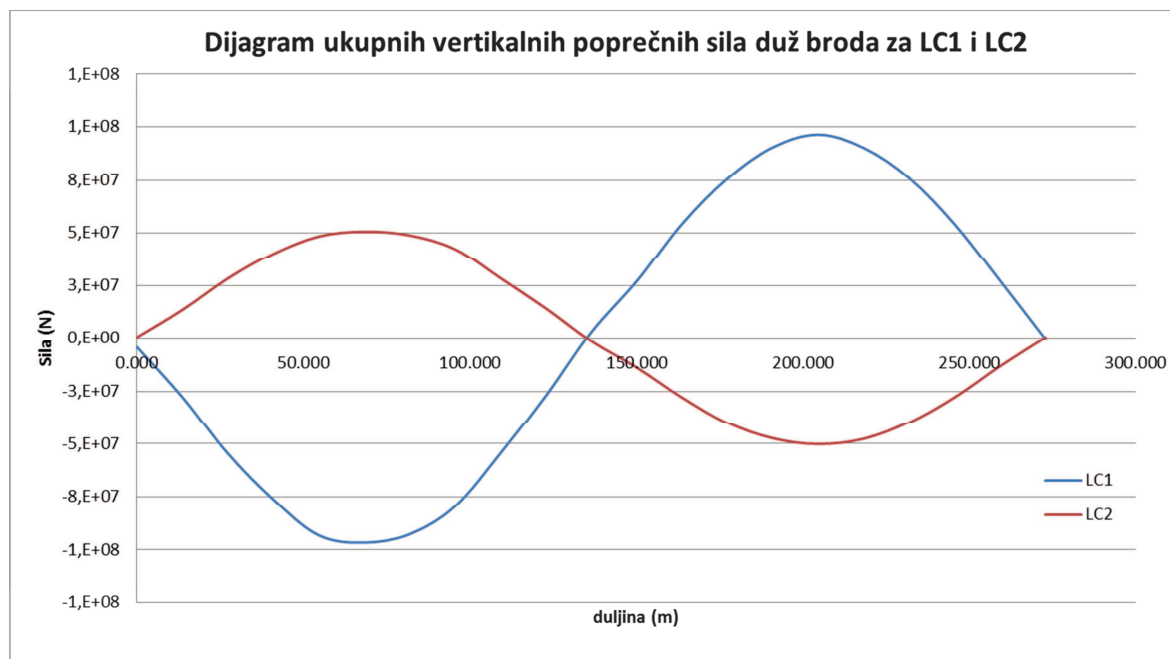


Slika 12. Distribucija ukupnih vertikalnih valnih momenata savijanja za LC1 i LC2

Predznak momenata u MAESTRO numeraciji je:

PROGIB pozitivan (+),

PREGIB negativan (-)



Slika 13. Distribucija ukupnih poprečnih sila duž broda za LC1 i LC2

Vertikalna opterećenja po palubama koje služe za smještaj putnika su dobivena proračunom prema Pravilima DNV [4] izrazom:

$$p_5 = 0.35(g_0 + 0.5a_v) \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4.2)$$

Gdje su

g_0 - akceleracija gravitacije $[\text{m/s}^2]$

a_v – vertikalna komponenta akceleracije $[\text{m/s}^2]$

Dok je vertikalno opterećenje na izloženom dijelu reces palube dobiveno prema Pravilima DNV [5] izrazom:

$$p_2 = (g_0 + 0.5a_v)q \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4.3)$$

Gdje su :

g_0 - akceleracija gravitacije $[\text{m/s}^2]$

a_v – vertikalna komponenta akceleracije $[\text{m/s}^2]$

q – teret na palubama $[\text{t/m}^2]$, ovisi o duljini broda

Detaljan proračun opterećenja dan je u prilogu A.

5. Odabir realne varijante omjera otvora i debljina okolne stijenke bočnih otvora novog koncepta za ispitivanje uzdužne čvrstoće

Nakon što je izrađen osnovni MKE model novog koncepta pristupilo se razmatranju utjecaja veličine otvora s pripadajućom debljinom okolne stijenke bočnih otvora na stupanj efikasnosti nadgrađa broda. Prvo je izrađena studija pomoću koje se odredila točnost *Fransmanove* metode membrane ekvivalentne debljine. Izrađen je fini MKE model prozora i grubi MKE model ekvivalentne membrane. Modelima je narinuto isto linijsko opterećenje s ciljem uspoređivanja smične krutosti dvaju modela. Sa postignutom zadovoljavajućom točnosti *Fransmanovog* modela krenulo se u modeliranje prozora koji se dodaju na osnovni MKE modela. Početni model prozora uzima u obzir proračunom dobivene vrijednosti debljina oplata i 5 varijacija veličina otvora u svrhu dobivanja tendencije kretanja distribucije naprezanja. Nakon toga izrađeno je još 20 modela s raznim varijantama debljina oplata oko otvora i omjera veličina otvora kako bi dobili plohu učinkovitosti nadgrađa. Učinkovitost nadgrađa računala se prema formuli *Caldwell-a*. Uz pomoć rezultata ispitivanja kretanja distribucije naprezanja po visini i plohe učinkovitosti nadgrađa odabran je model s najrealističnijom kombinacijom omjera veličine otvora i debljine pripadajuće oplata oko prozora za analizu odziva i reprojektiranje.

5.1. Fransmanova metoda membrane ekvivalentne debljine

Metoda membrane ekvivalentne debljine je analitički postupak za proračun ekvivalentne krutosti bočnih otvora, temeljenog na grednoj teoriji smicanja i savijanja. Kao rezultat postupka dobiva se ekvivalentna debljina membrane koja ima smičnu krutost približno jednaku stvarnom panelu s otvorom [2]. U radu je prikazan test usporedbe modela s finom MKE mrežom i MKE modela s membranom ekvivalentne debljine, pri jednakom linijskom opterećenju kako bi se uvjerali u točnost korištenja elemenata ekvivalentne membrane. Detaljnije o metodi se nalazi u [2].

Glavne dimenzije modela su:

Razmak između okvira, s : 2730 mm

Visina između paluba, h : 2750 mm

Širina otvora, s_w : 2000 mm

Visina otvora, h_w : 2000 mm

Omjeri otvora su:

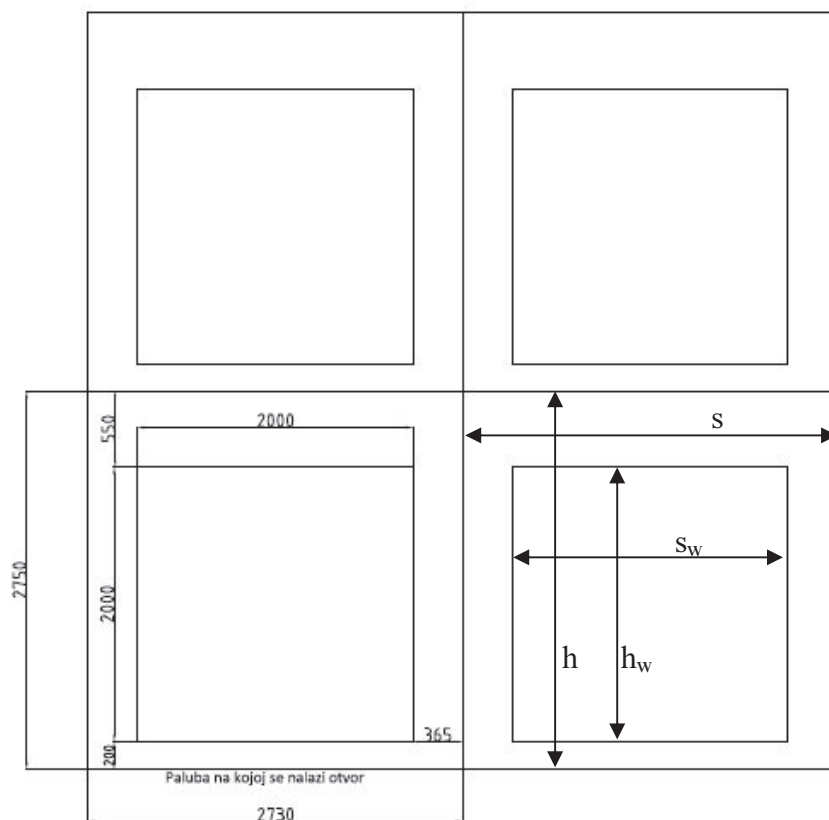
Omjer razmaka između okvira i širine otvora je:

$$\frac{s_w}{s} = 0,73 \quad (5.1)$$

Omjer razmaka između visine između paluba i visine otvora je:

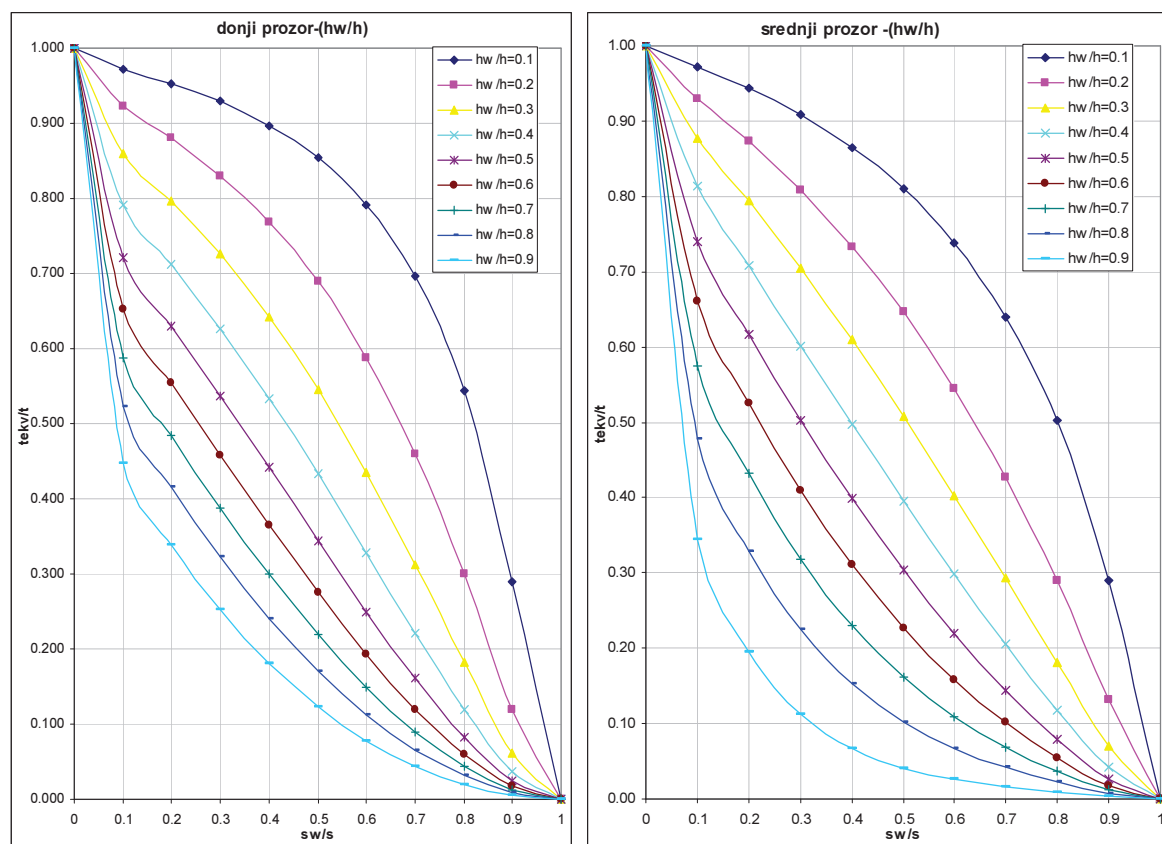
$$\frac{h_w}{h} = 0,73 \quad (5.2)$$

Prikaz prozora, s pripadnim dimenzijama i položajem otvora dan je Slikom 14.



Slika 14. Dimenzije otvora i njihov položaj na boku

Za proračun elementa bočnog otvora čija je ekvivalentna debljina određena korištenjem *Fransmanove* metode korišteni su dijagrami prikazani na Slici 15, [2].



Slika 15. Dijagrami za određivanje ekvivalentne debljine membrane za modeliranje oplata boka s otvorima po metodi ekvivalentne smične krutosti [2].

Za provedenu usporedbu vrijednosti ekvivalentnih debljina membrane za pripadajuće omjere otvora dane su u Tablici 3. Debljina stjenke je konstantna po visinama te iznosi 8 mm.

Tablica 3. Debljine ekvivalentne membrane za debljinu stjenke od 8 mm

Pozicija otvora	Omjer otvora	Debljina ekvivalentne membrane [mm]
Donji otvori	0,73	0,54
Ostali otvori	0,73	0,4064

Zbog trenutnih potreba ispitivanja fini MKE model je jednostavne geometrije. Detalji poput kružnih oblika kutova u svrhu smanjenja koncentracije opterećenja nisu modelirani. Model je u visini od tri palube, te je oplata modelirana četverokutnim i trokutnim pločastim konačnim elementima. Krutost palube simulira štapni konačni element određene površine poprečnog presjeka koji se nalazi na mjestu palube, na spoju dvaju modela otvora. Oko otvora nalaze se okviri koji su također modelirani štapnim konačnim elementima određene površine poprečnog presjeka.

Potrebna površina poprečnog presjeka štapnog konačnog elementa za simulaciju palube iznosi:

$$A_p = \frac{2}{3} B_p t_p \quad [\text{mm}^2] \quad (5.3)$$

Te za palubu čije dimenzije su:

Širina palube, B_p :	13,172 m
Debljina palube, t_p :	5 mm

Potrebna površina poprečnog presjeka iznosi:

$$A_p = 43906 \quad \text{mm}^2$$

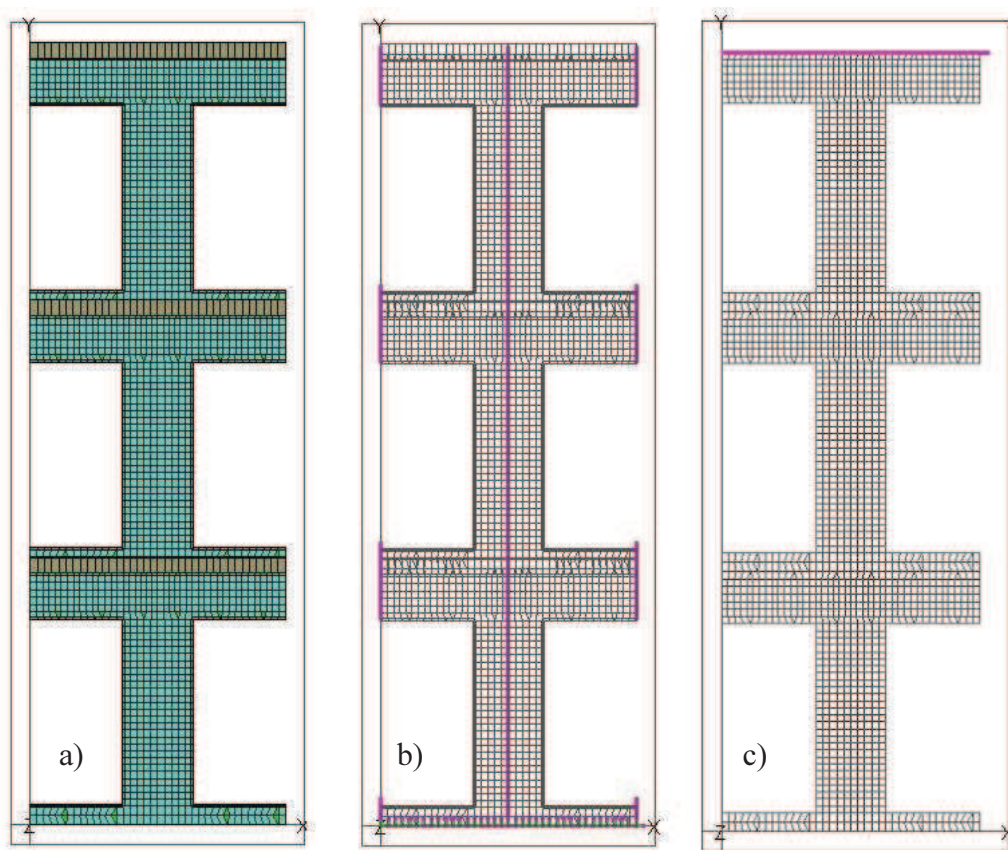
Potrebni poprečni presjek štapnog konačnog elementa za okvir oko otvora je uzet kao konstanta te iznosi:

$$A_o = 1350 \quad \text{mm}^2$$

Rubnim uvjetima modela se na donjim čvorovima spriječio pomak kao kruto tijelo, spriječeni su rotacijski i translacijski pomaci, dok se čvorovima na bočnim krajevima i u sredini spriječio translacijski pomak čvorova u smjeru Y-osi, vidi Sliku 16. Model opterećenja je linijski, te opterećenje iznosi:

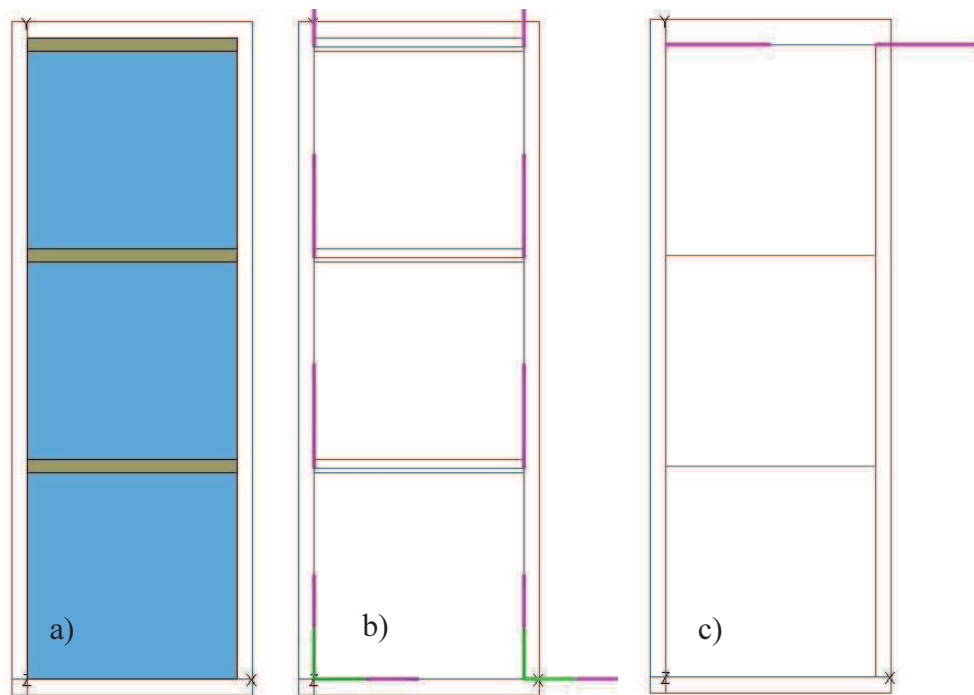
$$Q = 1 \quad [\text{MN/m}]$$

Opterećenje je postavljeno u najvišim čvorovima modela, te je svakom čvoru pridodana zasebna vrijednost opterećenja u smjeru X-osi, vidi sliku 16, koje ovisi o broju čvorova u liniji na modelu.



Slika 16. Prikaz finog MKE modela prozora, a) MKE model, b) rubni uvjeti, c) linijsko opterećenje

MKE model membrane ekvivalentne debljine ima iste rubne uvjete i isto linijsko opterećenje te je prikazan Slikom 17.



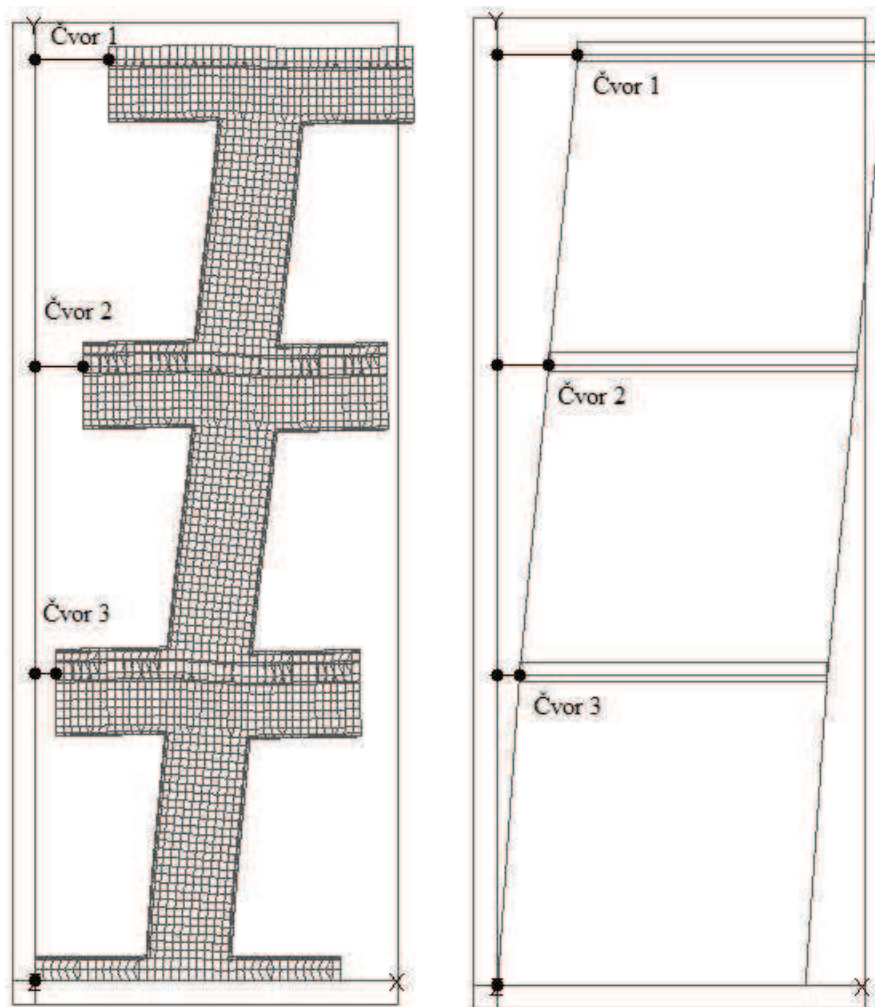
Slika 17. Prikaz MKE model s membranom ekvivalentne debljine,
a) MKE model, b) rubni uvjeti, c) linijsko opterećenje

Uspoređivanjem pomaka istih čvorova finog MKE modela i MKE modela membrane ekvivalentne debljine dobio se uvid u krutost membrane. Rezultati ispitivanja točnosti metode su dani u Tablici 4.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja

Čvor	Pomak čvora finog MKE modela	Pomak čvora Fransmanovog MKE modela	Greška [%]
1	218,4	237,5	8,76
2	141,4	151,2	6,99
3	60,2	64,9	7,74

Srednja greška iznosi 7,83%, te je ta razina pogreške prihvatljiva za konceptualnu fazu projektiranja. Izgled deformiranih modela i lokacije čvorova koji su se uspoređivali dani su Slikom 18.

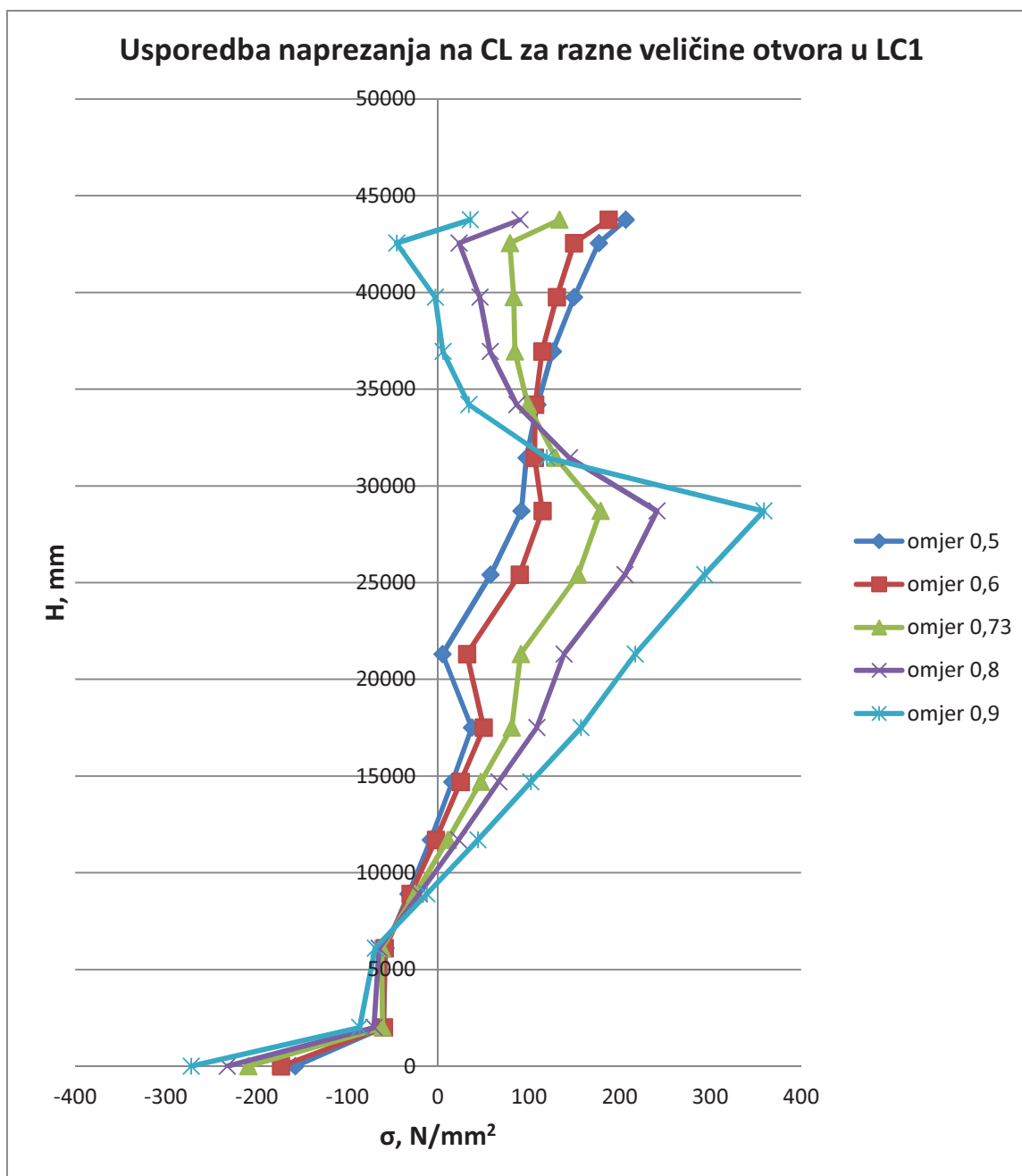


Slika 18. Deformirani MKE modeli i čvorovi koji su se uspoređivali, lijevo je fini MKE model prozora, desno je MKE model membrane ekvivalentne debljine

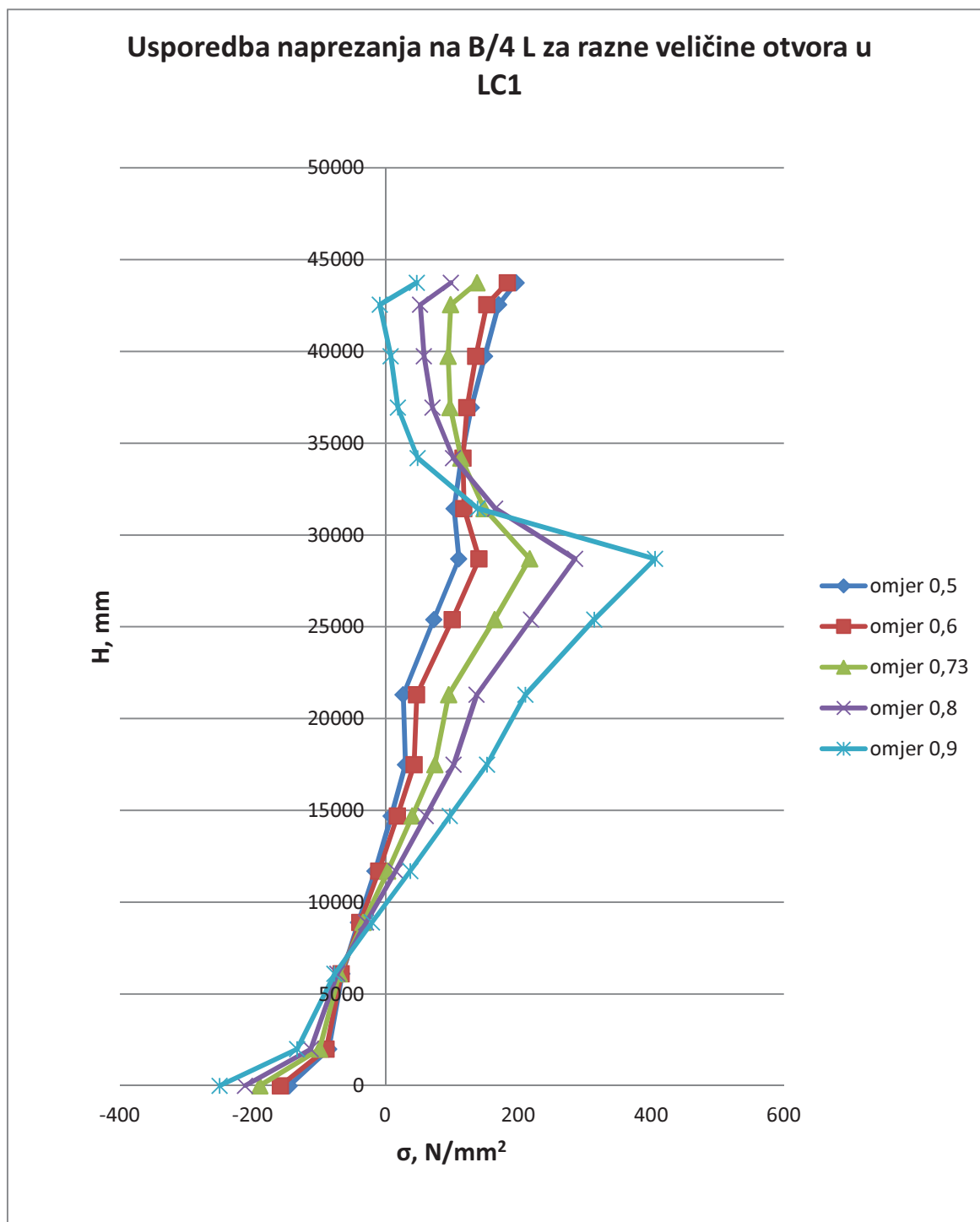
5.2. Usporedba distribucije naprezanja po visini početnog/osnovnog MKE modela konstrukcije

Usporedba distribucije naprezanja po visini je napravljena da bi se dobio uvid u kretanje naprezanja u ovisnosti o veličinama otvora, tj. o omjerima otvora za konstantnu debljinu bočne stijenke oko otvora. Za konstantnu debljinu stijenke od 8 mm varirali su se omjeri otvora u vrijednostima od 0.5 do 0.9.

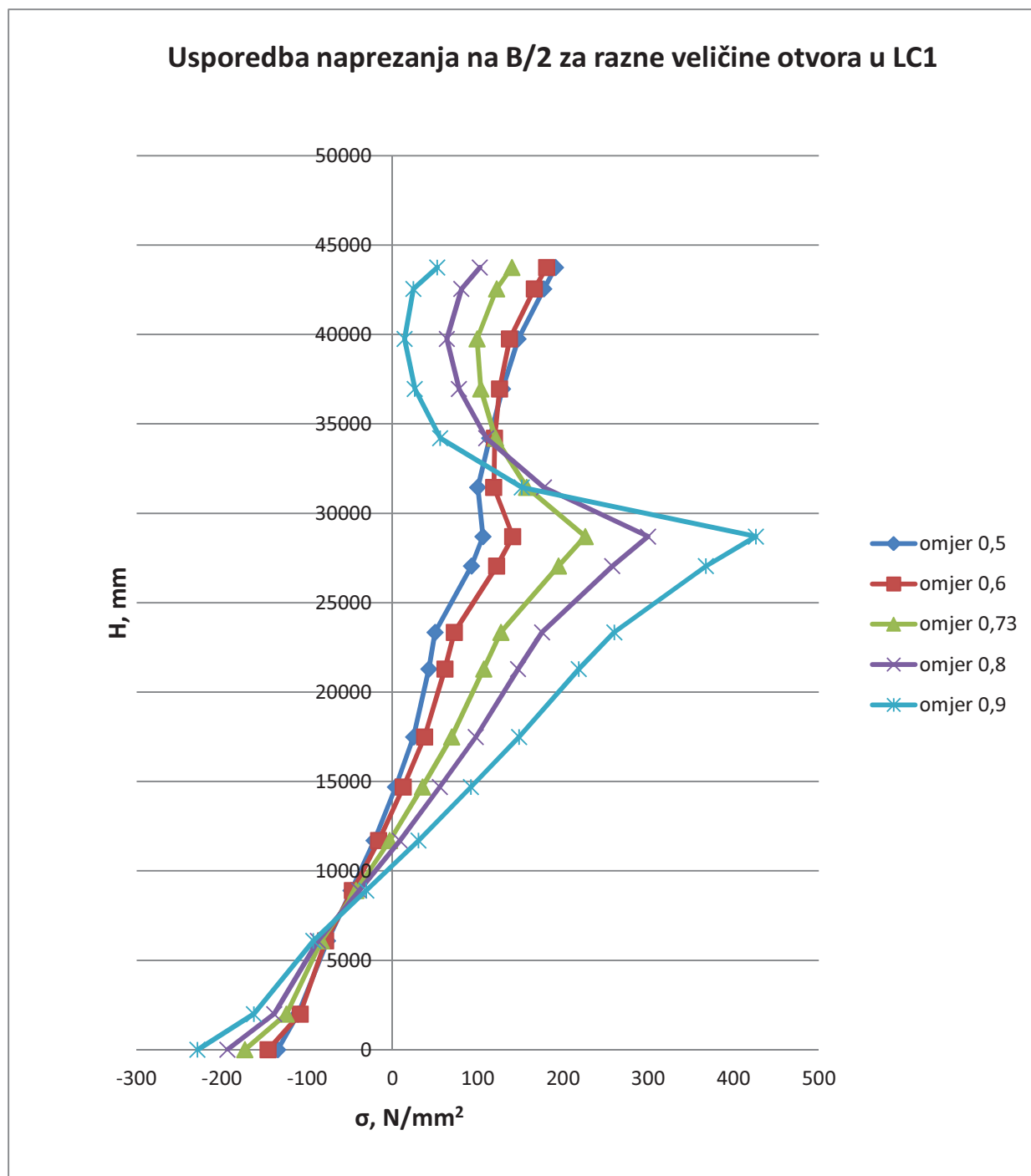
Dobivena naprezanja za slučaj opterećenja LC1, maksimalni pregib i za slučaj opterećenja LC2, maksimalni progib, su se uspoređivali na lokacijama CL, B/4 i B/2. Kretanja naprezanja u ovisnosti o veličinama otvora su prikazani skupnim dijagramima na Slikama 19-24. Napomena, pošto je cilj ovog ispitivanja bio samo dobiti kretanje naprezanja, ovi modeli se nisu reprojektilali kako bi zadovoljili zahtjevima primarne čvrstoće.



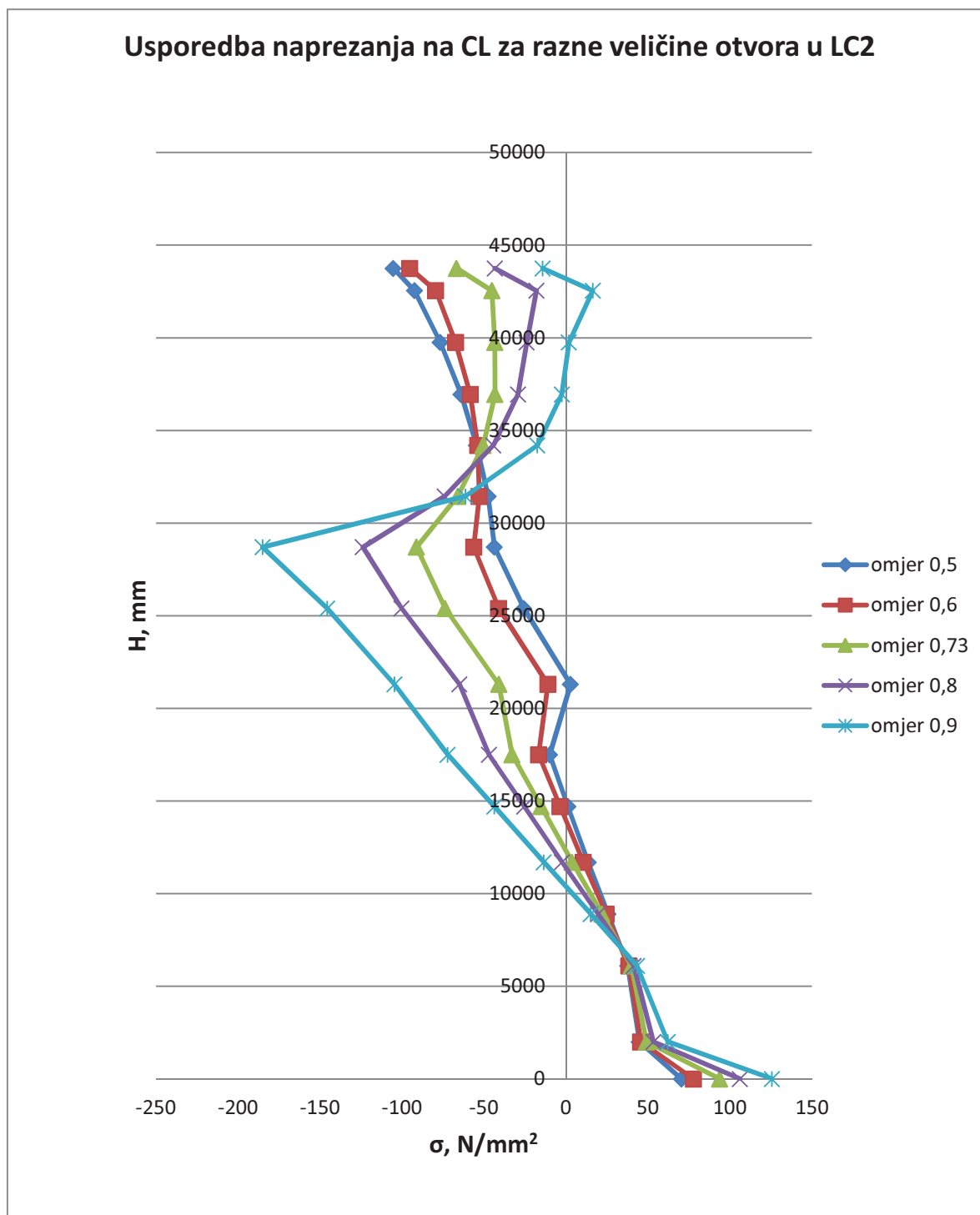
Slika 19. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji CL za slučaj LC1



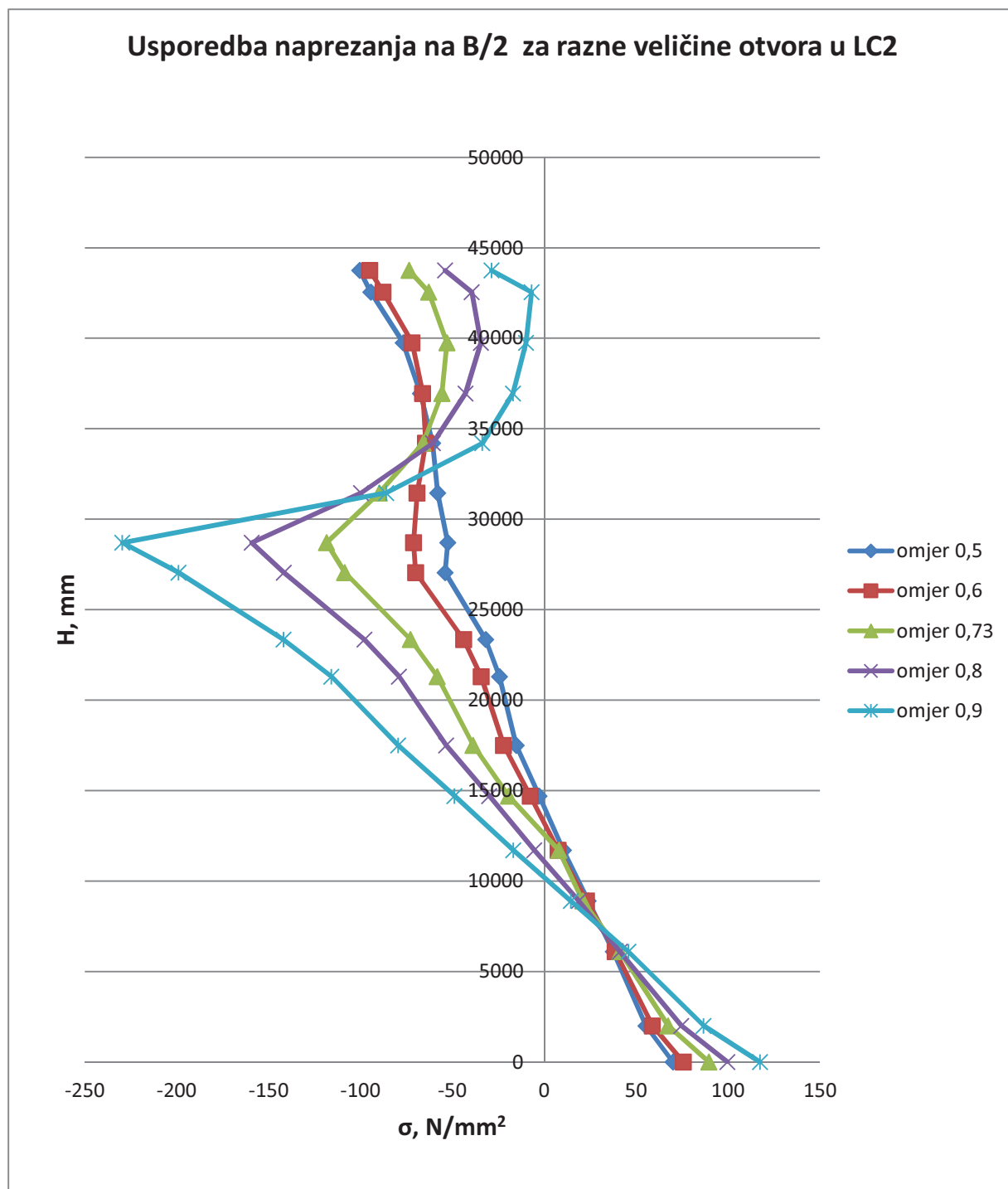
Slika 20. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/4 za slučaj LC1



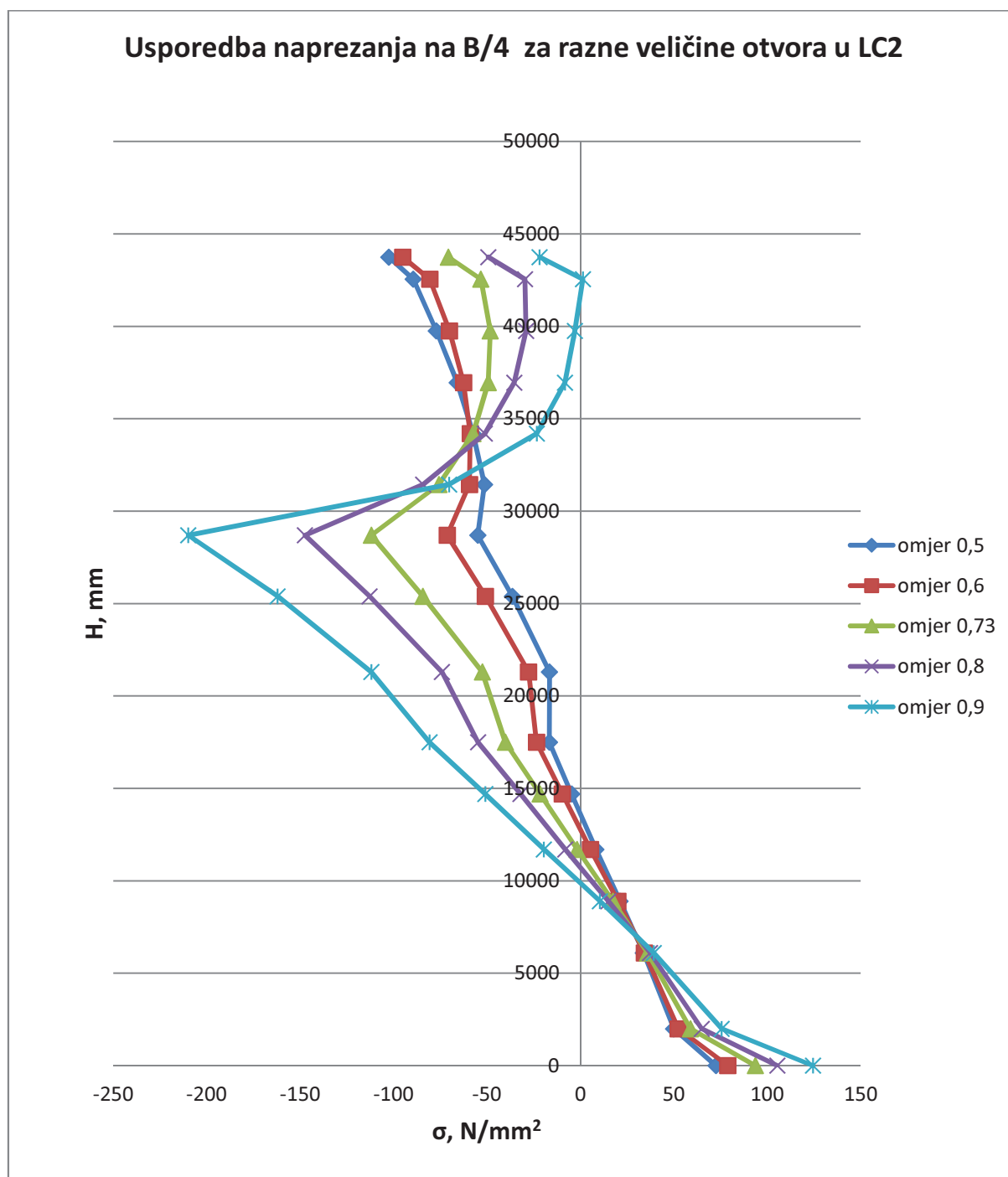
Slika 21. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/2 za slučaj LC1



Slika 22. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji CL za slučaj LC2



Slika 23. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/2 za slučaj LC2



Slika 24. Dijagram usporedbe distribucije naprezanja na lokaciji B/4 za slučaj LC2

Pomoću distribucije naprezanja možemo približno predvidjeti i odrediti željenu distribuciju naprezanja novog koncepta, što nam direktno utječe na debljine paluba i veličine strukturnih elemenata prilikom reprojektiranja konstrukcije.

5.3. Učinkovitosti paluba nadgrađa

Za daljnji odabir realne varijante novog koncepta pristupio se ispitivanju učinkovitosti nadgrađa. Stupanj učinkovitosti nadgrađa nam govori koliko gornje palube, tj. palube iznad palube čvrstoće, u ovom slučaju to je paluba D9 na $H = 27800$ mm, sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći. Analiza senzitivnosti je odrađena kako bi se pronašla ovisnost stupnja učinkovitosti nadgrađa o veličini otvora i debljini stjenke oplata. Provedba analize se sastoji od određivanja stupnja učinkovitosti za svaki pojedini osnovni model novog koncepta kojemu su bili varirani omjeri veličine otvora u granicama od 0,5 do 0,9 i varirane debljine stjenke oplata oko otvora u granicama od 8 mm do 16 mm, s korakom od 2 mm. Ukupno je ispitano 25 modela pomoću kojih smo dobili 3D odzivnu plohu učinkovitosti („*response surface*“) koja nam pomaže pri odabiru najrealističnije kombinacije omjera otvora i debljine stjenke oplata, skupni rezultati su prikazani Tablicom 5 i Slikama 25 – 27.

Efikasnost paluba nadgrađa će se izraziti stupnjem efikasnosti η_s koji je *Caldwell* [2] definirao omjerom između stvarnog opterećenja koje nadgrađe prenosi i teoretskog opterećenja koje bi nadgrađe nosilo u slučaju potpune efikasnosti [2]:

$$\eta_s = \frac{\sigma_{x0} - \sigma_x}{\sigma_{x0} - \sigma_{x1}} \quad (5.4)$$

Gdje je

σ_{x0} – max. Naprezanja na gornjoj palubi trupa izračunata teorijom grede pod pretpostavkom 0% efikasnosti nadgrađa;

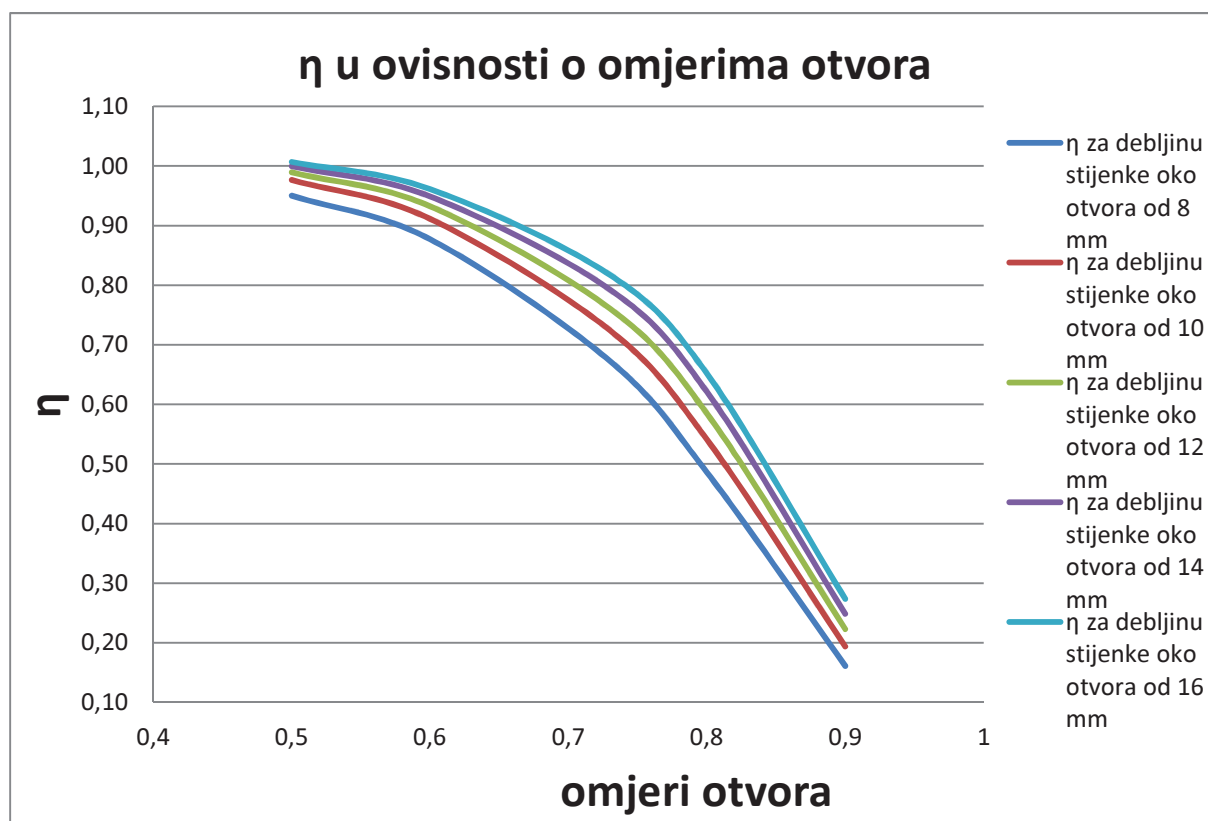
σ_x – maksimalna izračunata (npr. MKE) naprezanja na gornjoj palubi trupa s nadgrađem;

σ_{x1} – max. Naprezanja na gornjoj palubi trupa izračunata teorijom grede pod pretpostavkom 100% efikasnosti nadgrađa

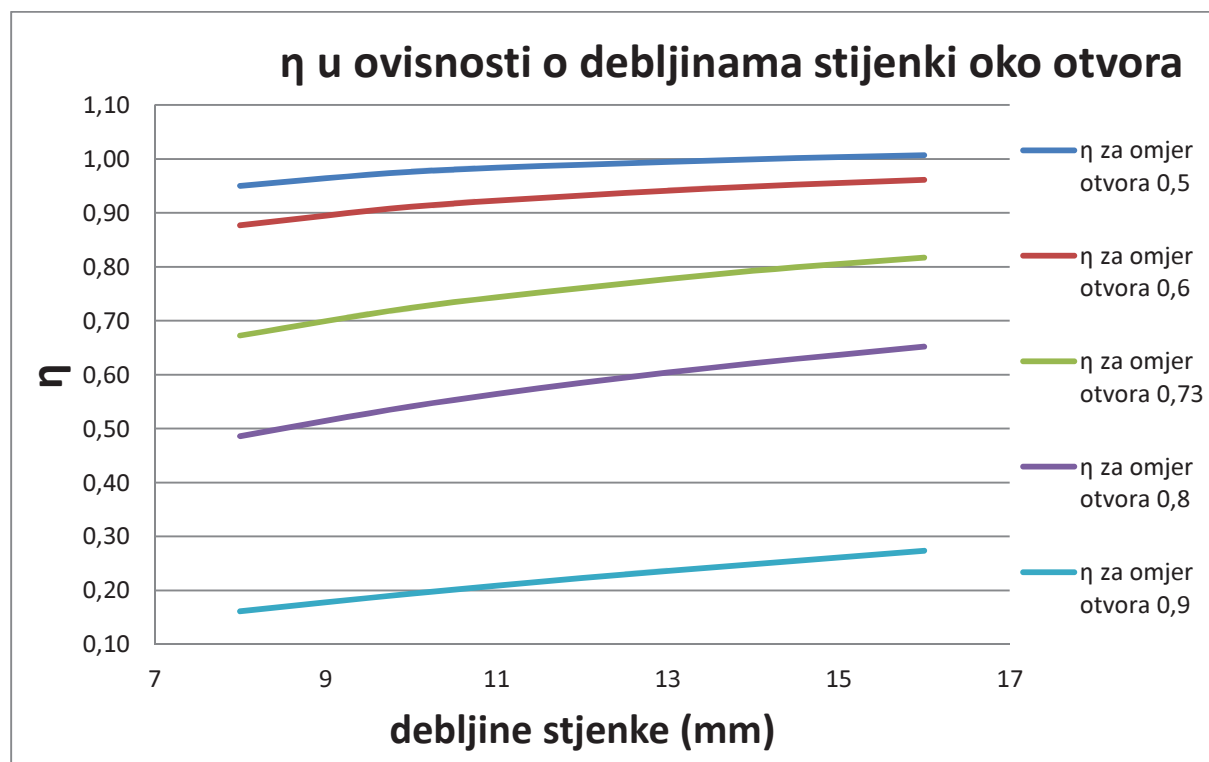
U ovoj analizi gornja paluba trupa (paluba čvrstoće) smatra se paluba D9.

Tablica 5. Skupna tablica učinkovitosti za sve varijante

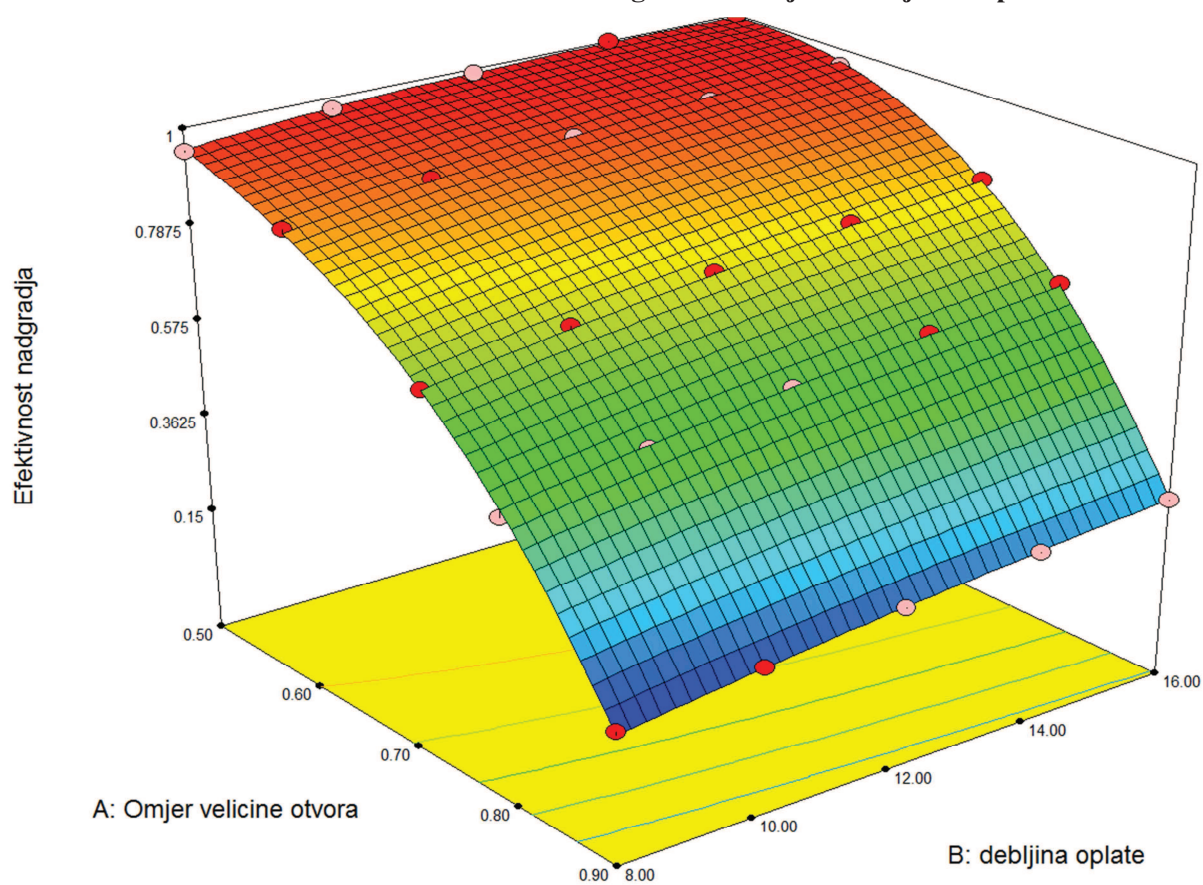
Omjeri t [mm]	Stupanj učinkovitosti – η				
	8	10	12	14	16
0,5	0,95	0,98	0,99	1,00	1,01
0,6	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96
0,73	0,67	0,72	0,76	0,79	0,82
0,8	0,49	0,54	0,58	0,62	0,65
0,9	0,16	0,19	0,22	0,25	0,27



Slika 25. Senzitivnosti ovisnosti učinkovitosti nadgrađa o omjerima otvora



Slika 26. Senzitivnosti ovisnosti učinkovitosti nadgradnja o debljinama stijenki oplata oko otvora



Programom *Design Expert* se interpolacijom 25 točaka sa raznim vrijednostima debljina oplata, omjera veličina otvora i učinkovitosti prikazanih u Tablici 5 dobila odzivna ploha učinkovitosti, Slika 27. Jednadžbom plohe koja glasi :

$$\eta = 0,81 - 0,34A + 0,066B + 0,021AB - 0,2A^2 - 0,014B^2 - 0,029A^2B + 0,003425AB^2 - 0,045A^3 + 0,003876B^3 \quad (5.5)$$

Gdje su:

A: Vrijednosti omjera veličine otvora

B: Vrijednosti debljina oplata

Možemo, za bilo koju kombinaciju vrijednosti A i B unutar njihovih granica, odmah dobiti stupanj efikasnosti nadgrađa.

Iz odzivne plohe učinkovitosti i pripadnih dijagrama, vidi Slike 25 - 27, se saznalo da debljina stjenke nema toliki utjecaj na stupanj učinkovitosti paluba nadgrađa kao što to ima omjer otvora. Pravilno dimenzioniranje i odabir finalne debljine stijenke otvora ovisi o detaljnoj distribuciji naprezanja oko otvora i moguće je odrediti samo finim MKE modelima, vidi poglavlje 6.

5.4. Odabir realne kombinacije omjera otvora i debljine stjenke oko oplata

Za odabir kombinacije su korištena dva kriterija, prvi je distribucija naprezanja po visini, a drugi je učinkovitost paluba nadgrađa. Gledajući usporedne dijagrame distribucije naprezanja na Slikama 19 – 24 vidljivo je da je omjer otvora od 0,73 najbolji izbor. Razlog tome je taj što omjer od 0,73 ima distribuciju naprezanja koja na palubi čvrstoće, D9, daje naprezanja koja se prilikom reprojekiranja, s relativno manjim promjenama debljina i veličina strukturnih elemenata, daju brzo dovesti u zadovoljavajuće vrijednosti. Palube iznad D9 bi vjerojatno u dobrom dijelu ostale nepromijenjene, ako ne i lokalno stanjene prilikom reprojekiranja. Što se tiče drugih omjera otvora, gledajući ostale distribucije naprezanja, kod omjera otvora od 0,5 i 0,6 distribucija naprezanja dobro aproksimira distribuciji koju bi dobili teorijom grede, ovo dodatno potvrđuju dijagrami na Slikama 25 i 26. Kod takve distribucije modelu bi se prilikom reprojekiranja, u svrhu smanjenja naprezanja, podebljavale debljine i povećavali strukturni elementi gornjih paluba što bi direktno utjecalo na stabilitet broda.

Suprotno tome kod omjera otvora od 0,8 i 0,9 iz dijagrama na Slikama 19 – 24 vidljivo je da su naprezanja na palubi čvrstoće, D9, izrazito velika.

Pokušaj reprojekiranja ovakve strukture bi rezultirao debljinama oplata i veličinama strukturnih elemenata, na dotičnoj palubi i nekim nižim palubama, koji bi možda bili deblji i veći nego na dnu broda. Takav raspored bi opet imao, u nekom stupnju, utjecaj na stabilitet broda, ali i na samu težinu lakog broda koja bi bila veća nego kod prijašnjih varijanti, čime bi se izgubilo na nosivosti. Korištenje čelika vrlo visoke vlačne čvrstoće, tipa AH 40, za rješavanja ovakvog slučaja bi utjecalo na cijenu broda, zbog velike količine potrebnog čelika. Debljina stjenke od 12 mm je odabrana jer ona ima dovoljno dobru učinkovitost s obzirom na težinu. U analizu novog koncepta i reprojekiranje dalje se ide s kombinacijom gdje su omjeri otvora 0,73, a debljina stjenke iznosi 12 mm.

6. Analiza odziva novog koncepta i prijedlog rješenja

6.1. Podobnost konstrukcije [5]

Za provođenje analize uzdužne čvrstoće unutar $0.4L$ po visini prvi korak je bila provjera podobnosti uzdužnih elemenata konstrukcije. U ovom koraku smo izrađenom MKE modelu narinuli slučajeve opterećenja LC1 i LC2, te smo odzivom konstrukcije, u vidu proračunom dobivenih naprezanja i deformacija, mogli prepoznati strukturne elemente koji ne zadovoljavaju kriterije podobnosti. Elementi koji ne zadovoljavaju će biti redimenzionirani, tj. odabirati će se prikladniji elementi za taj dio konstrukcije s većim momentom otpora W (uzdužnjaci) i/ili većom debljinom oplata nego postojeći. Model podobnosti nam daje informaciju o prekoračenju odziva konstrukcije i o nedovoljnoj sigurnosti elemenata strukture. Predstavljen je bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija – BIBLIOTEKA OGRANIČENJA koja ograničava izbor projektnih varijabli samo na one za koje će projekt konstrukcije biti dobar, odnosno koje će zadovoljiti sve projektne kriterije ograničenja. Biblioteku ograničenja čini matematička formulacija projektnih kriterija u formi projektnih ograničenja kao funkcije projektnih varijabli. Izlazne rezultate BIBLIOTEKE OGRANIČENJA predstavljaju, za pojedine kriterije ograničenja, vrijednosti za IZDRŽLJIVOST – C (*Capability*), ZAHTJEV – D (*Demand*) i PARAMETAR PODOBNOSTI – g (*adequacy parameter*) [5]. Odnos gore navedenih vrijednosti prikazan je u normaliziranom obliku, izrazom:

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D} \quad (6.1)$$

Gdje je:

g – faktor podobnosti $-1 \leq g \leq 1$

C – izdržljivost (*Capability*)

D – naprezanje (*Demand*)

γ – faktori sigurnosti

Parametar podobnosti g je rangiran između vrijednosti $+1 \div -1$. Granični slučajevi su:

$$g \rightarrow 1 \quad \text{ako } D \rightarrow 0 \quad ; \quad g \rightarrow -1 \quad \text{ako } C \rightarrow 0$$

Sigurnost elemenata strukture je zadovoljena ako se vrijednosti parametra podobnosti nalaze između 0 i 1 ($g \geq 0$). U slučaju da pojedini element nije sposoban podnijeti opterećenje, faktor podobnosti g će biti negativan ($g < 0$). Model kriterija strukturne podobnosti prikazan je kroz Tablicu 6, a koristi se kao standardni set kriterija u programu MAESTRO [6], s tim da su faktori sigurnosti definirani prema zahtjevima DNV [4].

Kroz Tablicu 7 prikazana su dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [4], gdje je σ dopušteno naprezanje, a f_1 faktor materijala koji iznosi:

$$f_1 = 1,0 \text{ za obični brodograđevni čelik}$$

$$f_1 = 1,28 \text{ za čelik povišene čvrstoće AH32}$$

Tablica 6. Biblioteka kriterija programa MAESTRO i faktori sigurnosti prema DNV

Br.	Kriterij	Opis kriterija	γ_{DNV}
1	PCSF	Panel Collapse – Stiffener Flexure	1.04
2	PCCB	Panel Collapse – Combined Buckling (Biaxial+Shear)	1.04
3	PCMY	Panel Collapse – Membrane Yield	1.00
4	PCSB	Panel Collapse – Stiffener Buckling	1.04
5	PYTF	Panel Yield – Tension Flange	1.04
6	PYTP	Panel Yield – Tension Plate	1.04
7	PYCF	Panel Yield – Compression Flange	1.04
8	PYCP	Panel Yield – Compression Plate	1.04
9,10	PSPB	Panel Serviceability – Plate Bending	1.04
11	PFLB	Panel Failure – Local Buckling	1.00
12	GCT	Girder Collapse Tripping	1.18
13	GCCF	Girder Collapse Compression in Flange	1.18
14	GCCP	Girder Collapse Compression in Plate	1.18
15	GYCF	Girder Yield Compression in Flange	1.24
16	GYCP	Girder Yield Compression in Plate	1.24
17	GYTF	Girder Yield Tension in Flange	1.24
18	GYTP	Girder Yield in Tension in Plate	1.24
19-21	FCPH	Frame Collapse, Plastic Hinge	1.50
22-24	FYCF	Frame Yield, Compression in Flange	1.31
25-27	FYTF	Frame Yield, Tension in Flange	1.31
28-30	FYCP	Frame Yield, Compression in Plate	1.31
31-33	FYTP	Frame Yield, Tension in Plate	1.31

Tablica 7. Dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [4]

Structure	Seagoing or harbour condition	Type of stress				Normal stress σ (N/mm ²)	Shear stress τ (N/mm ²)		Equivalent stress σ_e (N/mm ²)
		Hull girder stresses	Transverse bottom, side or deck girder stresses	Longitudinal bottom, side or deck girder stresses	Local stiffener bending stresses		One plate flange	Two plate flanges	
Longitudinal girders	Seagoing	X ¹⁾		X		190 f ₁	90 f ₁	100 f ₁	
	Harbour	X ¹⁾		X		190 f ₁	100 f ₁	110 f ₁	
Transverse and vertical girders	Seagoing		X			160 f ₁	90 f ₁	100 f ₁	180 f ₁
	Harbour		X			180 f ₁	100 f ₁	110 f ₁	200 f ₁
Girder brackets	Seagoing		(X)	(X)		200 f ₁ ²⁾			
	Harbour		(X)	(X)		220 f ₁ ²⁾			
Longitudinal stiffeners	Seagoing and harbour				X	160 f ₁			
	Seagoing and harbour			X	X	180 f ₁	90 f ₁		
	Seagoing and harbour	X ¹⁾		X	X	245 f ₁			
Transverse and vertical stiffeners	Seagoing and harbour		(X)	(X)	X	180 f ₁			
Stiffener brackets	Seagoing and harbour		(X)	(X)	X	225 f ₁			
X Stress component to be included (X) Stress component to be included when relevant 1) Includes the hull girder stresses at a probability of exceedance of 10 ⁻⁴ , see 406. 2) Shows allowable stress in the middle of the bracket's free edge. For brackets of unproven design, additional stress analysis in way of stress concentration areas may be required. Reference is made to acceptance criteria for local structure analysis, F300.									

Na osnovu dozvoljenih naprezanja definirani su faktori sigurnosti γ za MAESTRO kriterije popuštanja, vidi Tablicu 6. Zadani faktori sigurnosti uključuju i nepravilnosti u geometriji i zaostala naprezanja, budući da njihov utjecaj nije direktno uključen u formule.

Da bi se ostvarila željena podobnost konstrukcije, posebna pažnja se obratila kriterijima izvijanja PCSF, PCCB, PFLB, PCSB i BYF. Kriterij BCPH, koji je dalje objašnjen, nije mjerodavan u trenutnoj, konceptualnoj, fazi projektiranja. Razlog je taj što detalji poput koljena i sličnih strukturnih elemenata kojima se rješavaju koncentracije naprezanja, nisu modelirani u MKE modelu, te se zbog toga ovaj kriterij se izostavio iz kriterija koji su se trebali zadovoljiti u svrhu ostvarivanja primarne čvrstoće.

PCSF – ovaj kriterij razmatra tri načina kolapsa panela koji su uzrokovani savijanjem i uzdužnom kompresijom ukrepe;

I način: oštećenje ukrepe uslijed izvijanja

II način: oštećenje oplata uslijed izvijanja

III način : kombinirano oštećenje ukrepe i oplata uslijed izvijanja

PCCB –elastično izvijanje ukrepljenog panela nastalo uslijed uzdužnih, poprečnih, smičnih naprezanja u vidu interakcijske formule.

PFLB – lokalno izvijanje (plastično ili elastično) oplata između ukrepa zbog kombiniranog naprezanja

PCSB – izvijanje ukrepa (lateralno- torzijsko)

Nakon što su pronađeni nezadovoljavajući elementi strukture predlažu se korekcije. One se sastoje od povećanja debljina oplata, ukrepa ili postavljanja ukrepa protiv izvijanja (*anti-buckling*).

BYF – Ekvivalentna naprezanja prirubnice nosača nastalo uslijed tlačnih opterećenja ili vlačnih naprezanja. Za poprečna rebra-*frame* memonik je FYCF/ FYTF dok je za podveze-*girder* memonik je GYCF/ GYTF.

BCPH – kolaps grede uzrokovan stvaranjem dovoljno velikog broja plastičnih zglobova koji dopuštaju velike deformacije grede.

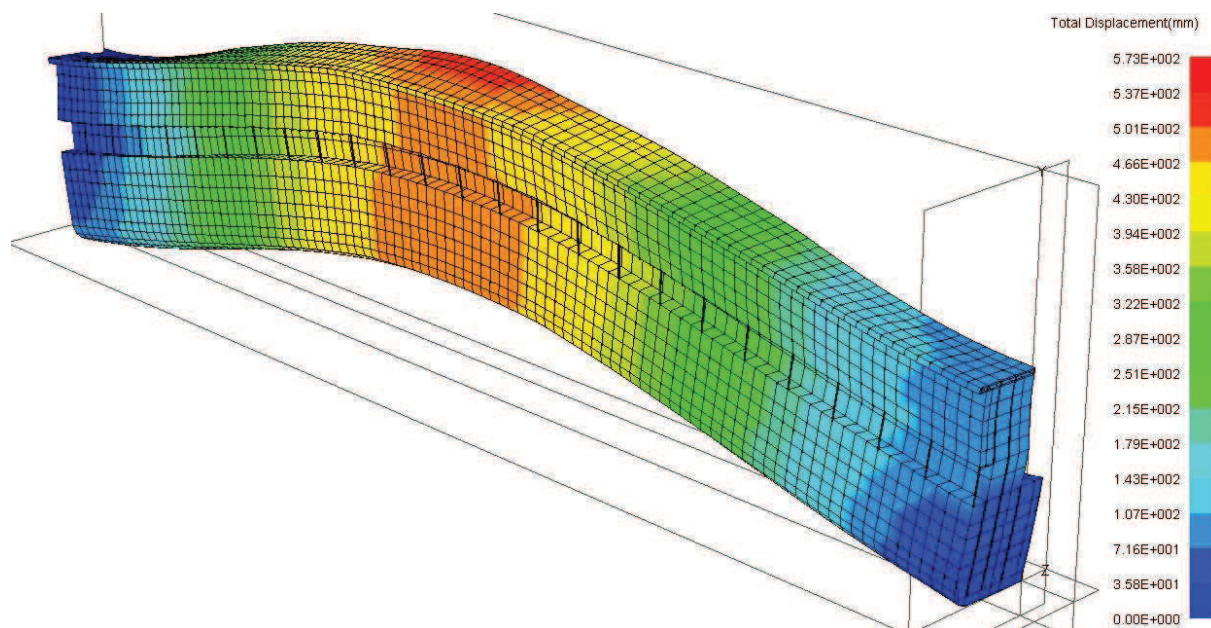
6.2. Analiza podobnosti prototipne konstrukcije, prijedlog rješenja i podobnost prijedloga rješenja

Nakon implementiranja slučajeva opterećenja prototipnoj konstrukciji novog koncepta u odzivu su pronađeni strukturni elementi koji ne zadovoljavaju kriterije dane Tablicom 7. Deformacija konstrukcije vidljiva je za LC1 na Slici 28, a za LC2 na Slici 29. Dijelovi strukture koji ne zadovoljavaju su skoro sve palube, ali prilikom različitih slučajeva opterećenja. Palube oko recesa (D7 i D9) i najgornja paluba, D15, su u slučaju LC2 najopterećenije palube, te kod njih je najveći broj nezadovoljenih kriterija. Ostale palube između D9 i D15 su puno manje opterećene te je broj nezadovoljenih kriterija manji. U slučaju LC1 donje palube i dno su opterećeni dijelovi strukture. Palube D1 i D2 su u ovom slučaju imaju najveći broj nezadovoljenih kriterija, dok ostale palube su manje opterećene, te im je broj nezadovoljenih kriterija manji. Lokacija elemenata, njihove inicijalne dimenzije, načini oštećenja i prijedlog rješenja dani su Tablicom 8. Nepodobni strukturni elementi početne konstrukcije vidljivi su na Slici 30, a podobnost elemenata finalne konstrukcije vidljivi su na Slici 35. Slike 30 i 36 predstavljaju razmatrani dio konstrukcije unutar 0,4L. Zbog lakšeg pregleda nepodobnih i podobnih elemenata strukture prikazan je „najgori od svih“ kriterija, te su granice kriterija, samo radi prikaza, postavljene unutar -0.05 i 1. S tako postavljenim granicama svi nepodobni elementi su boje minimalne vrijednosti. Slikama 31 ÷ 33 i 37 ÷ 39 prikazan je cijeli model kako bi se prikazala distribucija primarnih naprezanja duž cijelog modela.

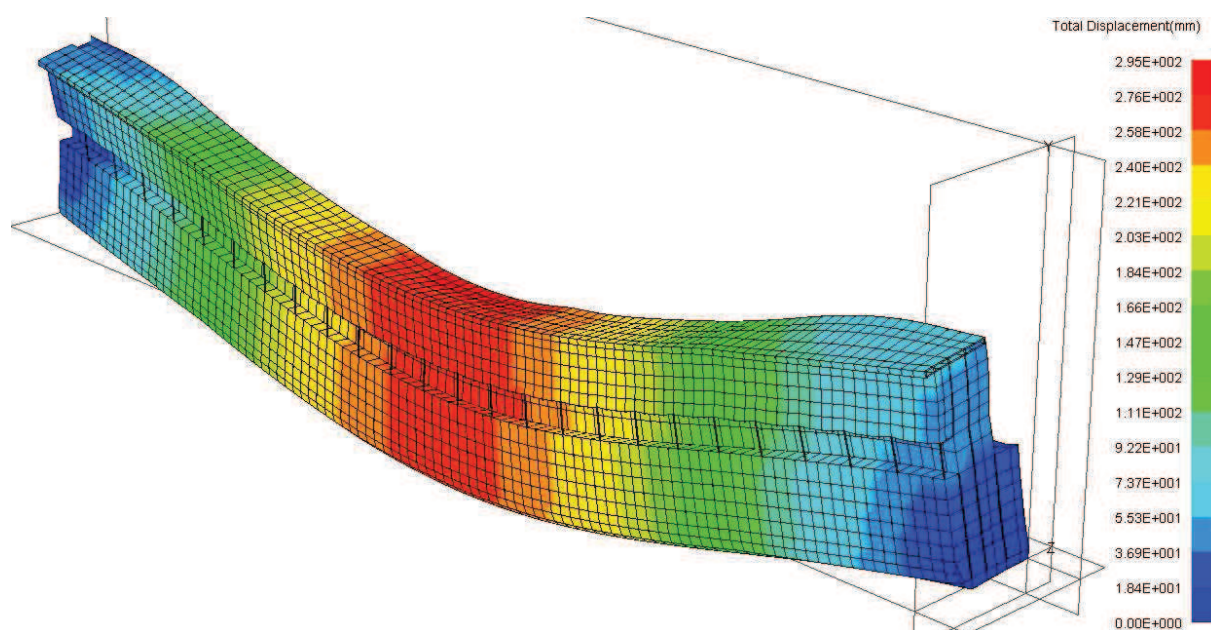
Tablica 8. Tablica s lokacijama oštećenja, prototipnim vrijednostima, tipovima oštećenja, prijedlogom rješenja i postignutim kriterijima

Lokacija	Prototip	Tip oštećenja i kretanja vrijednosti kriterija (prototip)	Prijedlog rješenja	Tip oštećenja i minimalna vrijednost kriterija (prijedlog)
Palube D8 D10 - 14	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = - 0.008 ÷ - 0.188 PCCB = - 0.018 ÷ - 0.094 PCSB = - 0.05 ÷ - 0.203	D8 HP 120x7 D10 HP 120x7 D11 HP 100x6 D12 HP 100x7 D13 HP 100x7 D14 HP 100x7	PCSF = - 0.05 PCCB = 0.167 PCSB = 0.083
Palube D7 D9 D15	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = - 0.018 ÷ - 0.279 PCCB = - 0.035 ÷ - 0.184 PCSB = - 0.098 ÷ - 0.288 PFLB = - 0.012 ÷ - 0.105	D7 HP 120x8, t = 6 ÷ 8 mm D9 HP 160x8, t = 6 mm D15 HP 140x8, t = 6 mm	PCSF = -0.02 PCCB = 0.157 PCSB = 0.123 PFLB = 0.015
Palube D2 D3 D4	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = - 0.008 ÷ - 0.574 PCCB = - 0.017 ÷ - 0.422 PCSB = - 0.025 ÷ - 0.139 PFLB = - 0.004 ÷ - 0.162	D2 HP 160x9 t = 11 mm D3 HP 120x8 t = 9 mm D4 t = 7 mm	PCSF = 0.031 PCCB = 0.345 PCSB = 0.496 PFLB = 0.373
Palube 2-6; D2-6; lokalno uz bok	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = - 0.138 ÷ - 0.574 PCCB = - 0.023 ÷ - 0.442 PCSB = - 0.096 ÷ - 0.432 PFLB = - 0.014 ÷ - 0.616	D2 HP 160x9 t = 12 mm D3 HP 120x8 t = 10 mm D4 t = 7 mm D5 t = 6 mm D6 HP 100x8	PCSF = 0.031 PCCB = 0.343 PCSB = 0.205 PFLB = -0.02
Dvodno, jaki nosači	t = 11.5 mm HP 240x10	PCSF = - 0.263 PFLB = - 0.282	t = 13 mm	PCSF = -0.011 PFLB = -0.180
Hrtenica uz poprečnu pregradu	t = 11.5 mm HP 240x10	PCSF = - 0.263 PFLB = - 0.282	t = 18 mm	PCSF = -0.05 PFLB = -0.107
Dno, oplata	t = 16 mm HP 260x12	PCSF = - 0.171 PFLB = - 0.296	t = 22 mm HP 300x13	PCSF = 0.001 PFLB = -0.017
Dno, oplata kobiličnog voja	t = 21 mm HP 260x12	PCSF = - 0.171 PFLB = - 0.164	t = 24 mm HP 300x13	PCSF = 0.001 PFLB = -0.036
Dno, oplata uzvoja	t = 13 mm HP 260x13	PFLB = -0.045	t = 14 mm	PFLB = 0.046
Palube 2 – 7, lokalno, voj uz liniju CL	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = - 0.075 ÷ - 0.271 PCCB = -0.01 ÷ -0.194 PCSB = -0.016 ÷ -0.103 PFLB = - 0.076 ÷ - 0.394	D2 HP 160x9 t = 12 mm D3 HP 120x8 t = 9 mm D4 t = 7 mm D5 t = 7 mm D6 HP 100x8, t = 7 mm D7 HP 120x7, t = 8 mm	PCSF = 0.159 PCCB = 0.163 PCSB = 0.221 PFLB = 0.002

Da bi se riješili problemi prema kriteriju PFLB za izvijanje oplata dna na tim pozicijama se postavljaju interkostalne ukrepe, dok se jaki uzdužni nosači lokalno podebljavaju na problematičnim mjestima. Ovi problemi su vidljivi na Slici 35.

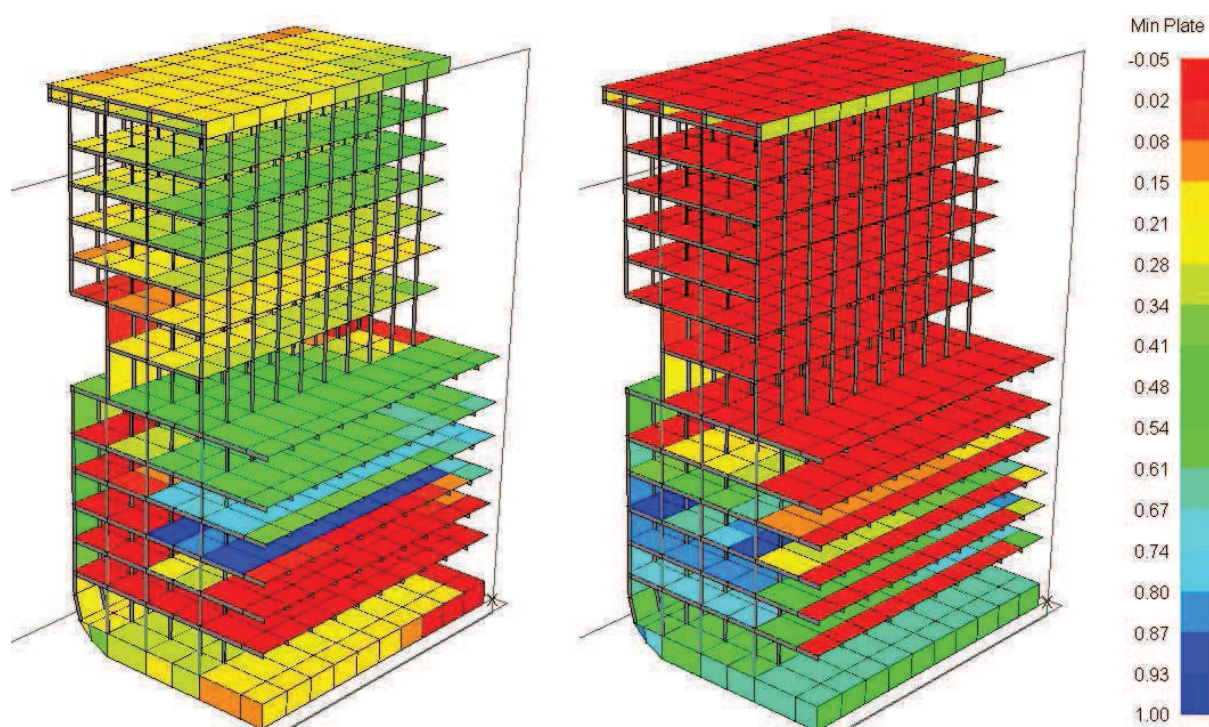


Slika 28. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela novog koncepta u pregibu-LC1

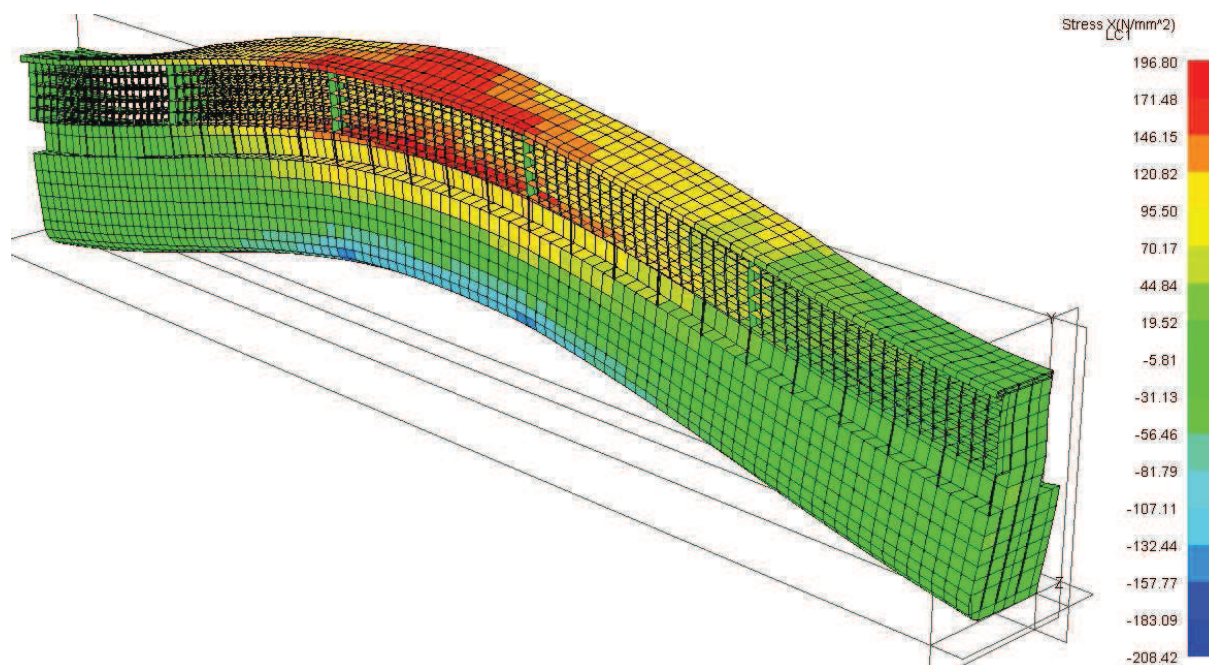


Slika 29. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela novog koncepta u progibu-LC2

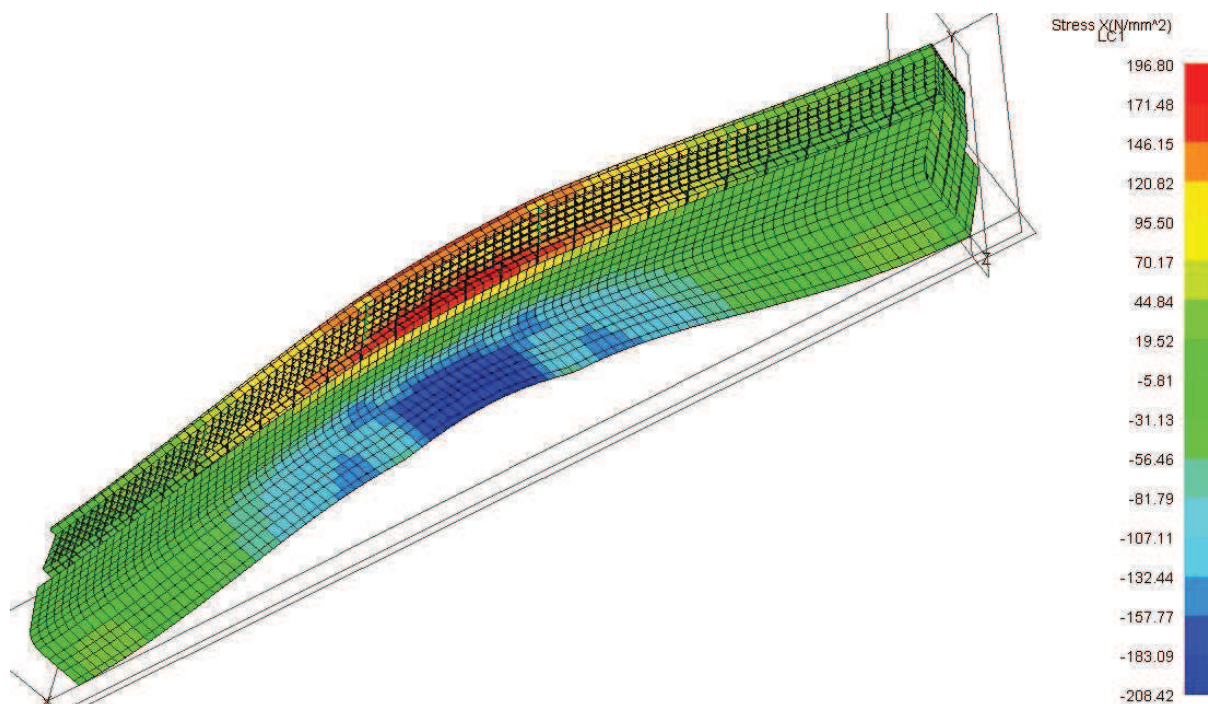
Najveće vertikalni pomaci promatranog prototipa modela su na sredini, za pregib $\delta = 573$ mm, a za progib $\delta = 295$ mm.



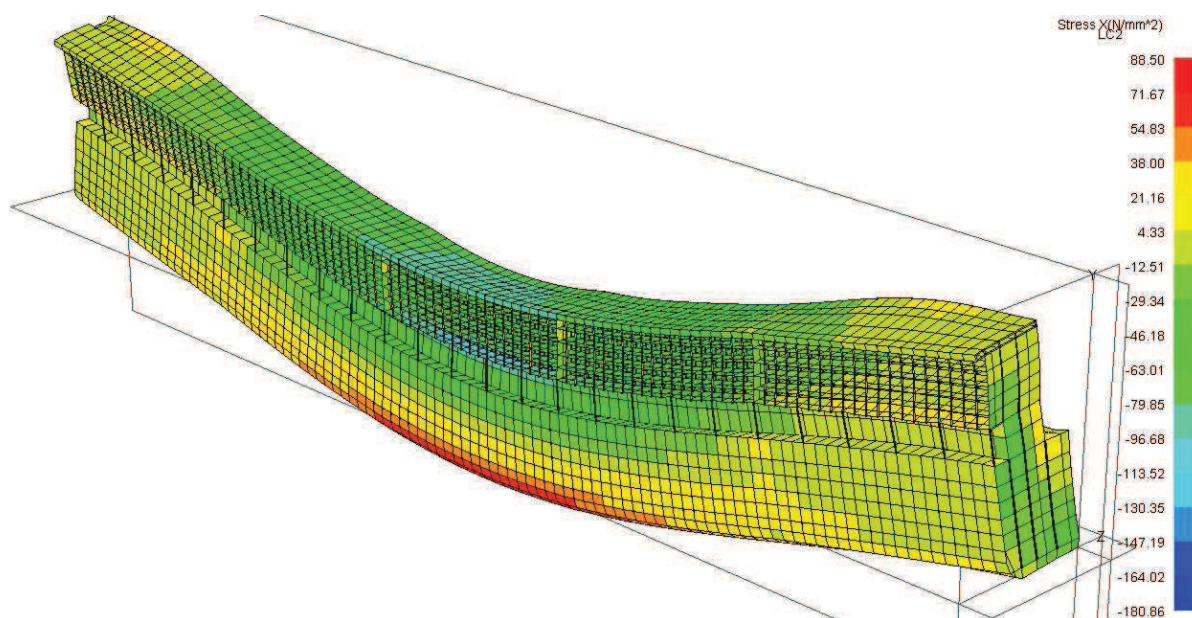
**Slika 30. Postignuti faktori sigurnosti prototipne konstrukcije novog koncepta
u slučaju LC1, lijevo i LC2, desno**



Slika31. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1

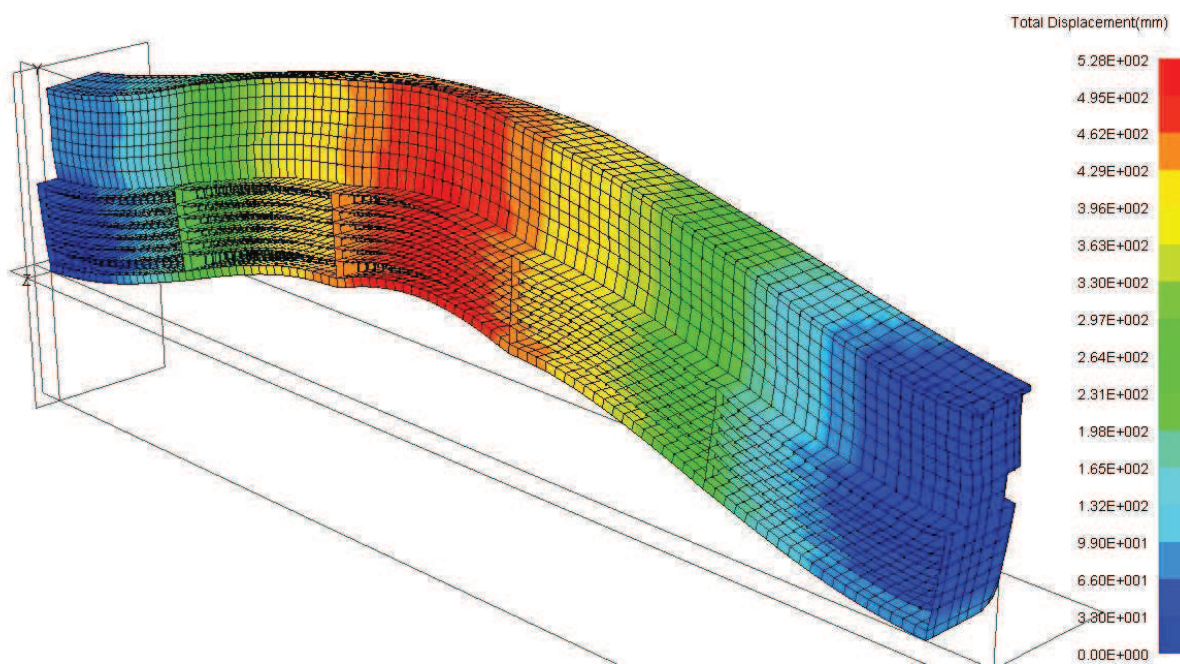


Slika 32. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1, pogled na dno

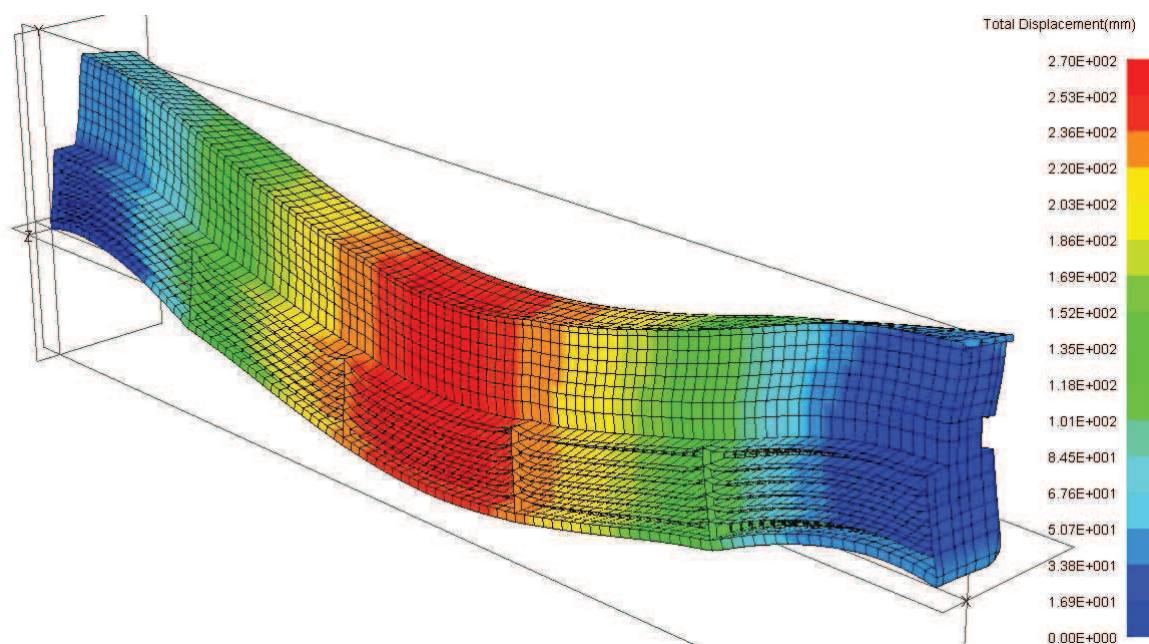


Slika 33. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC2

Pošto su u dnu naprezanja mala nema potrebe za slikom rasporeda naprezanja inicijalne konstrukcije sa pogledom na dno. Kod odziva prijedloga rješenja konstrukcije, nepodobni strukturni elementi pojavili su se samo u slučaju opterećenja LC1. Strukturni elementi jakih uzdužnih nosača, uz poprečnu pregradu, su nepodobni, ali samo prema kriterijima PCSF i PFLB. Strukturni elementi vertikalnih bočnih nosača i okolne konstrukcije koja se naslanja na veoma krute upore palube recesa također su nepodobni zbog toga što te upore prenose silu veću nego što ti elementi mogu podnijeti. Na D2 također postoji par nepodobnih elemenata, sponja. Nastali problemi u tim strukturnim elementima se rješavaju lokalnim podebljanjem strukturnih elemenata. Slika 36 prikazuje lokacije gore navedenih problematičnih elemenata. U slučaju opterećenja LC2, za iste vrijednosti razmatranih kriterija, naprezanja koja se javljaju u konstrukciji su mala pa nema nepodobnih elemenata, stoga slike s njihovim prikazima nisu dane.

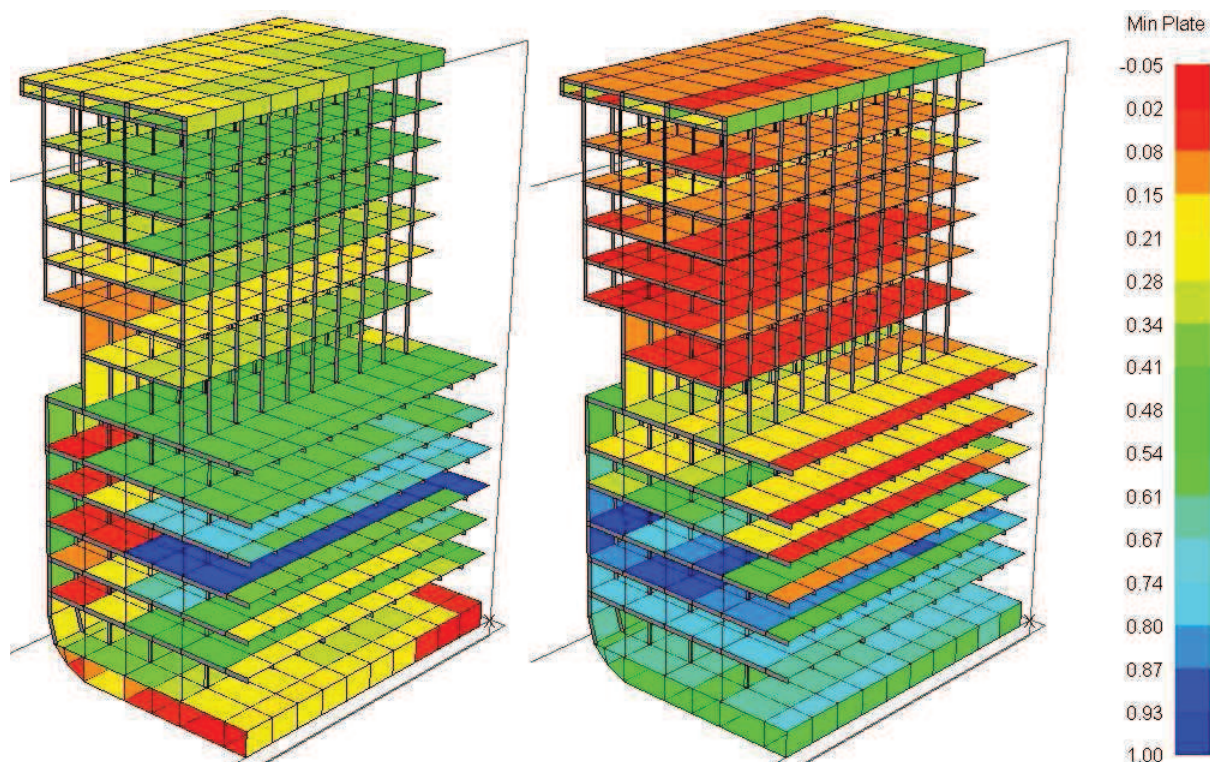


Slika 34. Prikaz pomaka prijedloga rješenja modela novog koncepta u pregibu-LC1

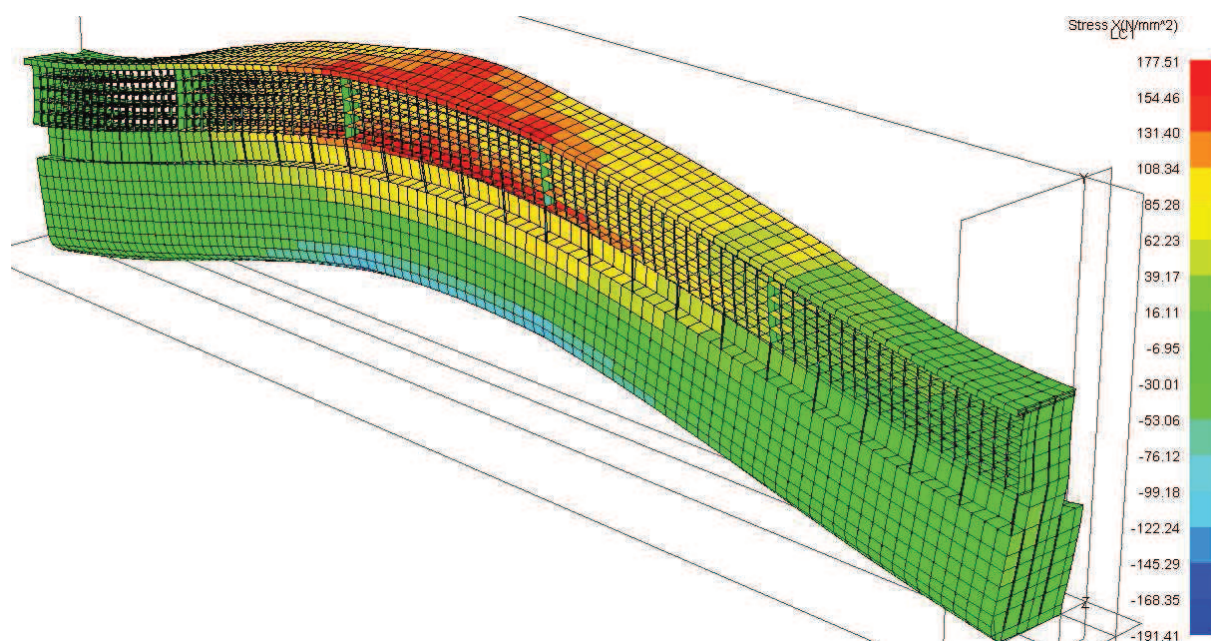


Slika 35. Prikaz pomaka prijedloga rješenja modela novog koncepta u progibu-LC2

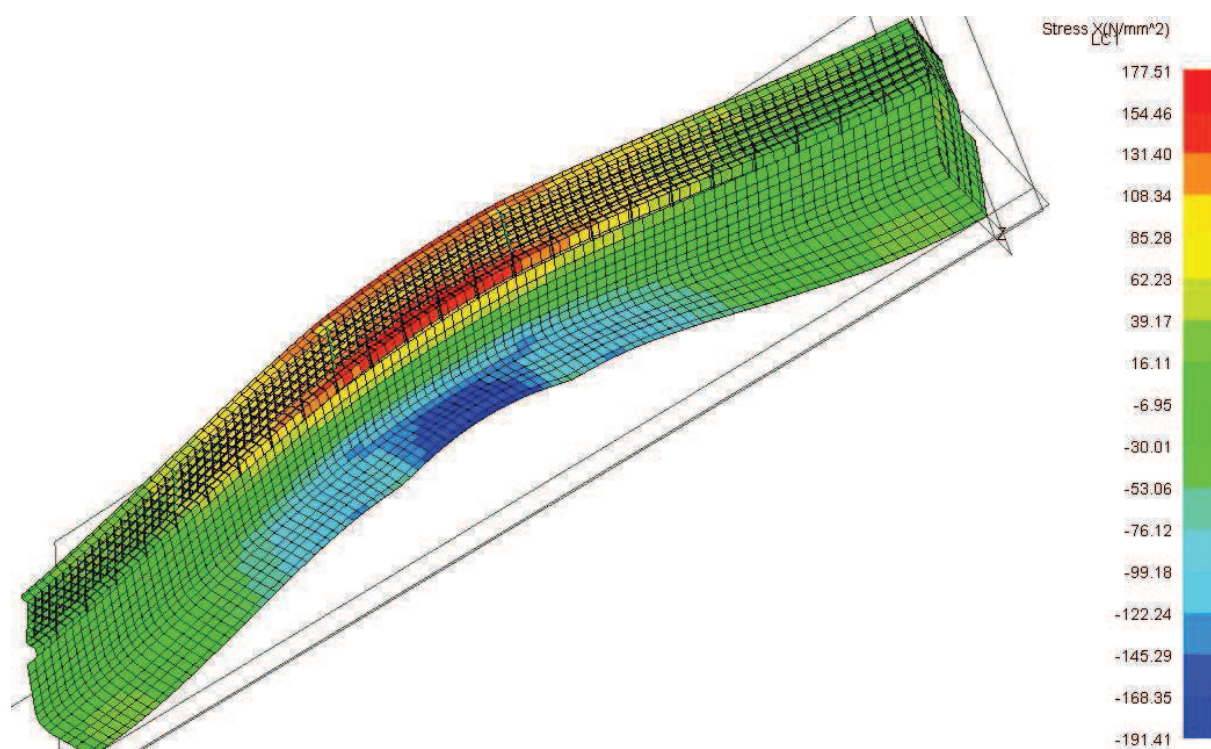
Najveće vertikalni pomaci promatranog modela prijedloga rješenja su na sredini, te iznose za progib $\delta = 528$ mm, a za progib $\delta = 270$ mm.



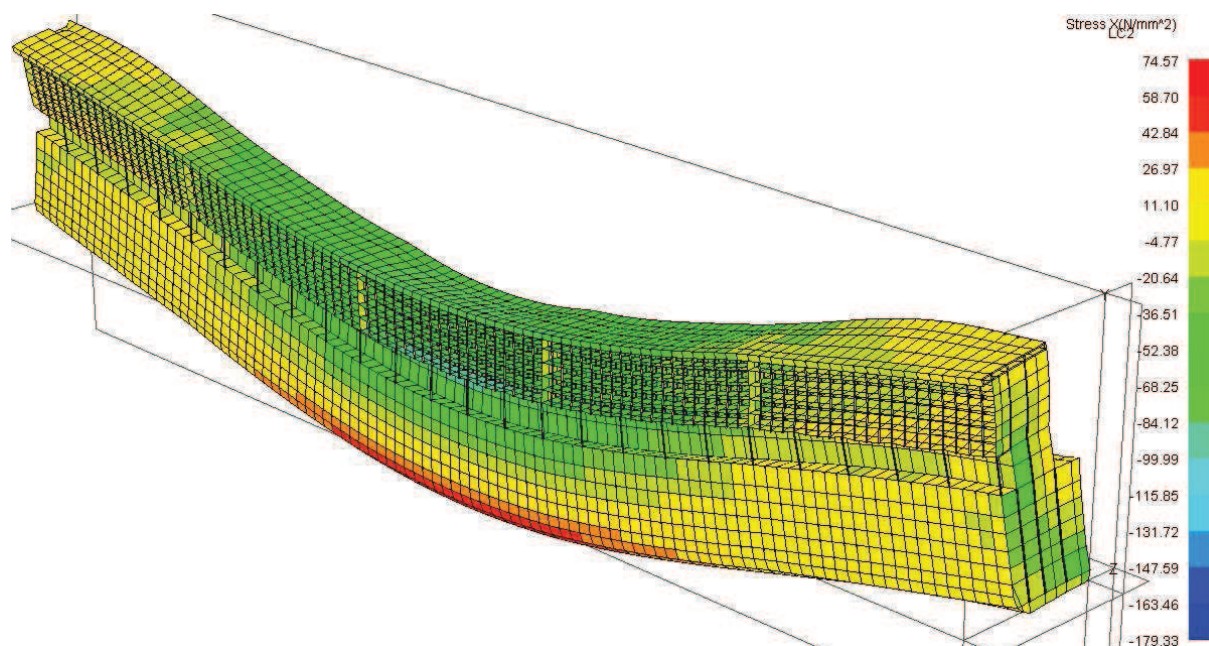
Slika 36. Postignuti faktori sigurnosti za prijedlog rješenja konstrukcije novog koncepta u slučaju LC1, lijevo i LC2, desno



Slika 37. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1



Slika 38. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1,
pogled na dno



Slika 39. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC2

Pošto su u dnu naprezanja mala nema potrebe za slikom rasporeda naprezanja prijedloga rješenja konstrukcije sa pogledom na dno.

6.3. Analiza naprezanja i učinkovitost nadgrađa predloženog rješenja novog koncepta

Dijagram distribucije naprezanja skupa s prikazom učinkovitosti paluba dan je u ovom poglavlju. Učinkovitost paluba nadgrađa, tj. stupanj s kojim one sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći objašnjen je u poglavlju 5.2., te ga nije potrebno ponovno objašnjavati. Rezultati su prikazani dijagramima na Slikama 40 i 41, a Tablicom 12 su prikazane dobivene učinkovitosti za oba slučaja opterećenja. U dijagrame je unesena i teoretska raspodjela normalnih σ_x naprezanja prema teoriji grede za slučajeve da nadgrađe iznad palube D9 ne pridonosi uzdužnoj čvrstoći (0% efikasnosti) i da potpuno sudjeluje (100% efikasnosti) [5].

Za slučaj od 0% efikasnosti nadgrađa računata su normalna naprezanja u palubi D9 i u dnu, prema izrazu:

$$\sigma_{xP} = \frac{M_t}{I_{zz}} \eta_P \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.2)$$

$$\sigma_{xD} = \frac{M_t}{I_{zz}} \eta_D \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.3)$$

Gdje je :

M_t – ukupni vertikalni moment savijanja na promatranom presjeku

I_{zz} – moment inercije poprečnog presjeka trupa do palube D9

η_P, η_D – udaljenost palube D9, odnosno dna od neutralne linije

U palubama iznad palube D9 pretpostavlja se da su normalna naprezanja jednaka nuli.

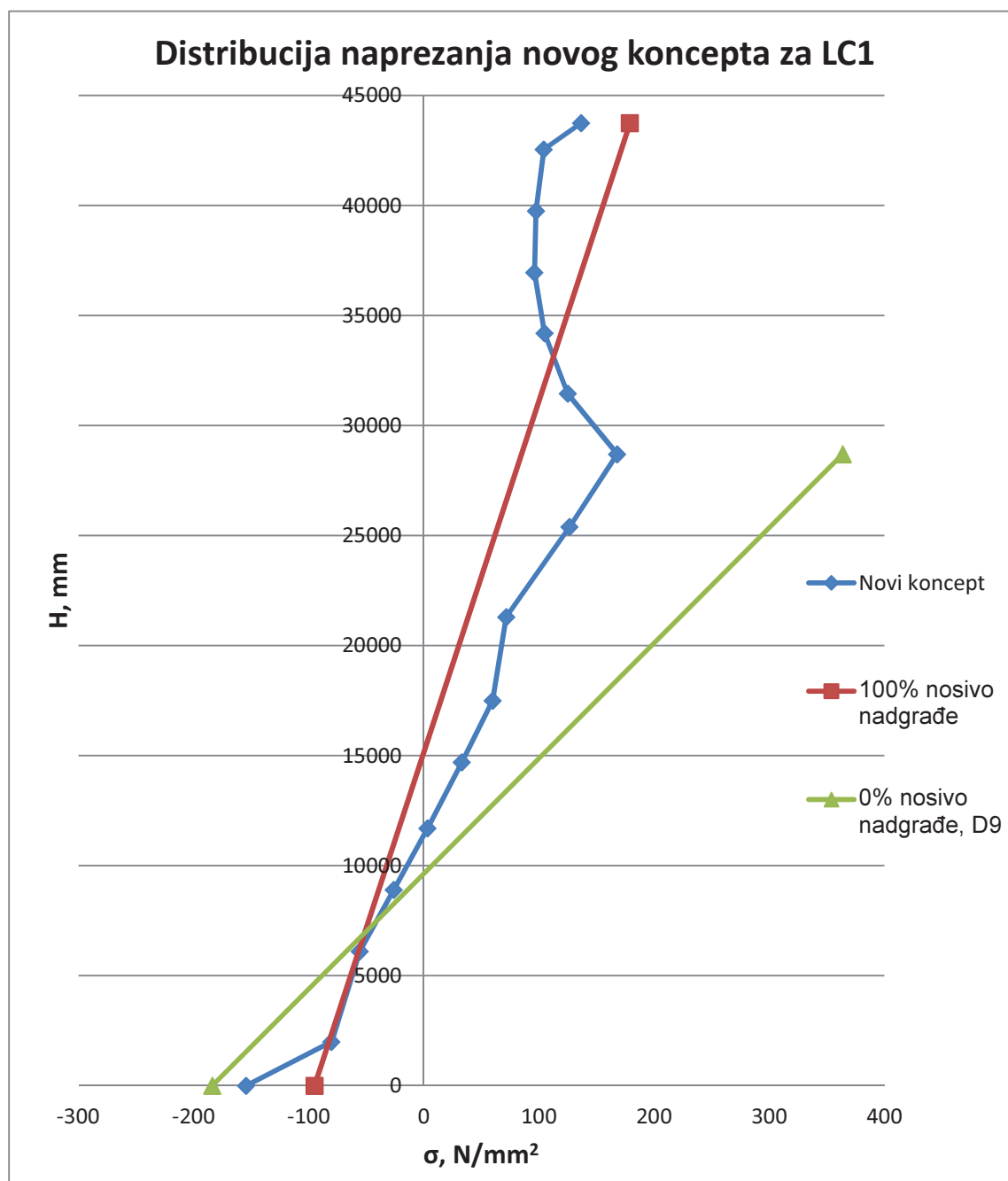
Za slučaj 100% efikasnosti nadgrađa računata su normalna naprezanja u najgornjoj palubi nadgrađa (palubi 15), odnosno dnu prema gornjim izrazima uz:

I_{zz} – moment inercije poprečnog presjeka trupa do palube D9

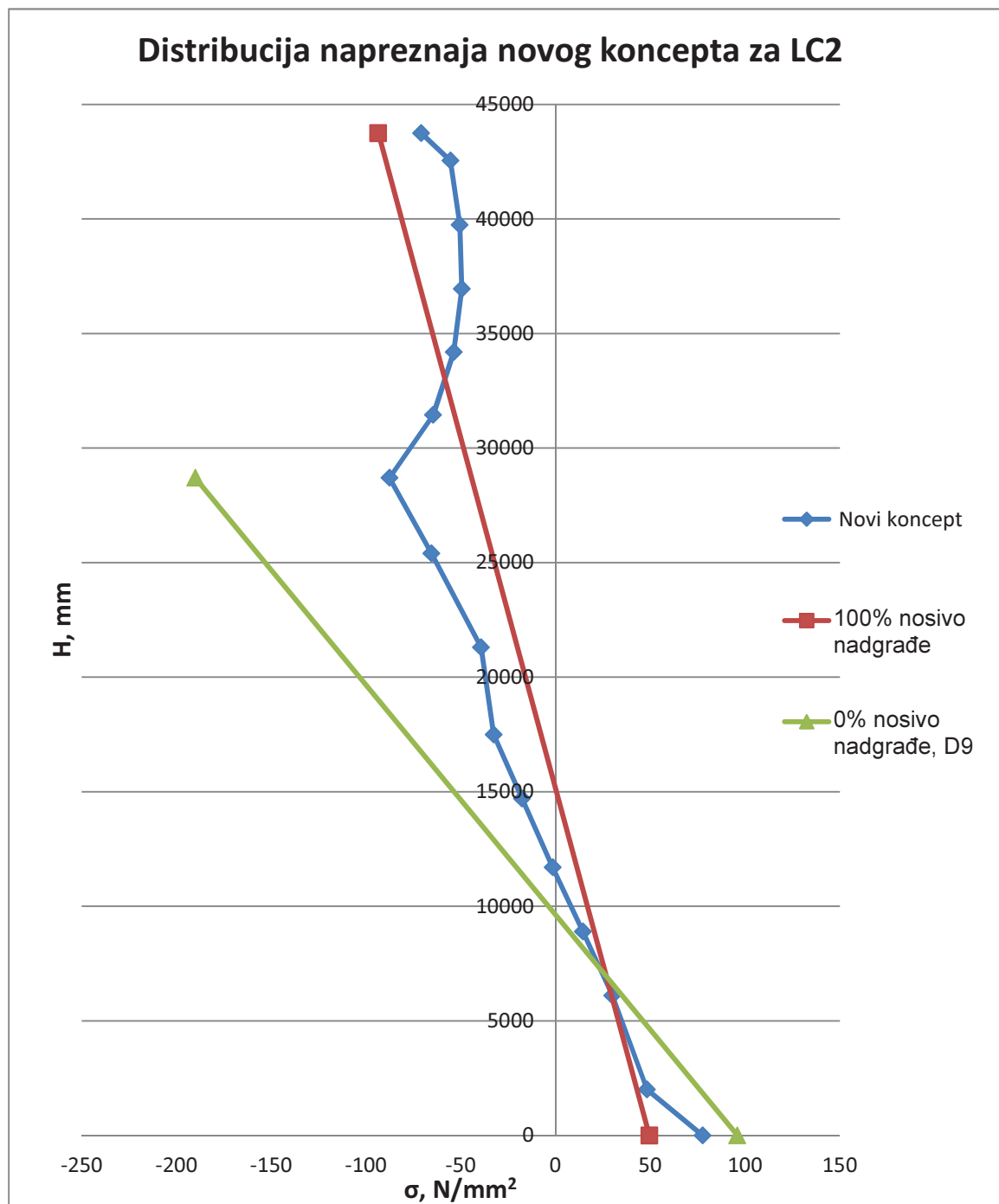
η_P, η_D – udaljenost palube D15, odnosno dna od neutralne linije

Gore spomenute vrijednosti za slučajeve 0% efikasnosti nadgrađa i potpune efikasnosti nadgrađa dane su Tablicama 9 - 11.

Veličine momenata inercije dobivene programom MAESTRO, a iznos momenta inercije do palube 9 dobiven je uklanjanjem iz modela svih paluba iznad palube 9. Iz dijagrama ukupnih vertikalnih momenata savijanja iščitan je moment savijanja (Slika 12).



Slika 40. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda slučaju opterećenja LC1



Slika 41. Prikaz rasporeda uzdužnih napreznaja po visini trupa broda slučaju opterećenja LC2

Tablica 9. Usporedba geometrijskih karakteristika efikasnog i neefikasnog nadgrađa

efikasnost nadgrađa	I_{yy} [cm ⁴]	z [mm]	η_D [mm]	η_P [mm]
100%	1,344860E+11	15138,80	15138,80	28611,20
0%	4,411890E+10	9627,36	9627,36	19072,64

Tablica 10. Usporedba momenata otpora inercije i otpora presjeka glavnog rebra

efikasnost nadgrađa	$I_{yy \text{ min}}$ (zahtjev DNV) [cm ⁴]	I_{yy} postignut [cm ⁴]	W_{min} (zahtjev DNV) [cm ³]	W_D postignut [cm ³]	W_P postignut [cm ³]
100%	3,25 E+10	1,34486E+11	3,97 E+7	8,883531E+7	4,700467E+7
0%		4,41189E+10		4,582658E+7	2,313204E+7

U Tablici 10 dana je usporedba zahtijevanog minimalnog momenta inercije i momenta otpora po Pravilima DNV [4] i ostvarenog prilikom reprojektiranja konstrukcije kod 0% i 100% efikasnosti nadgrađa iznad palube D9.

Tablica 11. Usporedba naprezanja efikasnog i neefikasnog nadgrađa

LC	σ_D 100% [N/mm ²]	σ_P 100% [N/mm ²]	σ_D 0% [N/mm ²]	σ_P 0% [N/mm ²]	σ_{FEM} [N/mm ²]
1	-94,734	179,039	-183,642	363,811	168,01
2	49,492	-93,535	95,940	-190,065	-87,57

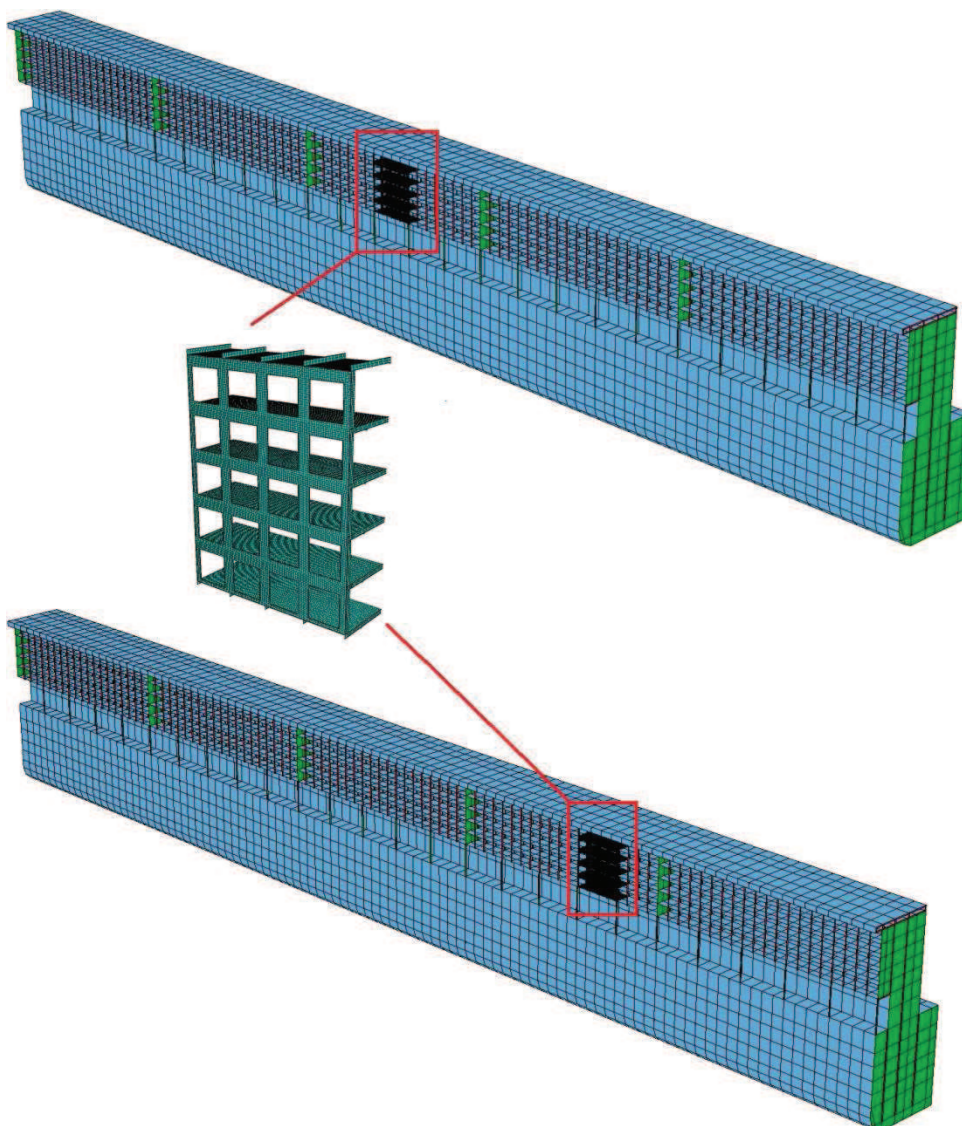
Tablica 12. Efikasnosti nadgrađa predloženog rješenja novog koncepta

LC	σ 0% [N/mm ²]	σ 100% [N/mm ²]	σ_{FEM} [N/mm ²]	η
1	363,811	84,861	168,01	0,7019
2	-190,065	-44,3340861	-87,57	0,7033
η srednje =				0,7026

Rezultati pokazuju da su, na lokaciji L/2, u oba slučaja opterećenja najveća na palubi D9, te što se ide prema višim palubama opadaju sve do najgornjih paluba gdje opet narastu, ali ne u tolikoj mjeri kao i na D9. Takva distribucija je očekivana prvenstveno zbog nedostatka uzdužne pregrade, te iz rezultata ispitivanja u Poglavlju 5.3. Nadgrađe u ovom slučaju je tek djelomično nosivo, a D9 se izraženije ponaša kao paluba čvrstoće. Stupanj učinkovitosti nadgrađa oko 0,7 to dodatno potvrđuje.

6.4. Dimenzioniranje stjenke bočnih otvora

Zbog načina modeliranja otvora u bokovima gornjih paluba, vidi poglavlja 4 i 5, tako dobiveni odziv ne pruža realnu distribuciju naprezanja u stjenkama pa nije moguće pravilno dimenzioniranje stjenke bočnih otvora. Izradom i implementacijom lokalnog finog MKE modela otvora i okolne konstrukcije, koji ima točniji model krutosti nego grubi MKE model, u postojeći grubi MKE modela dobivena je realna distribucija naprezanja i lokacije koncentracija naprezanja. Fini MKE model je prvo postavljen na lokaciji $0,5L$ koja teoretski odgovara mjestu najvećeg momenta savijanja i na lokaciji $0,25L$, koja teoretski odgovara mjestu najveće poprečne sile, Slika 42.



Slika 42. Prikaz finog MKE modela s pripadnim lokacijama

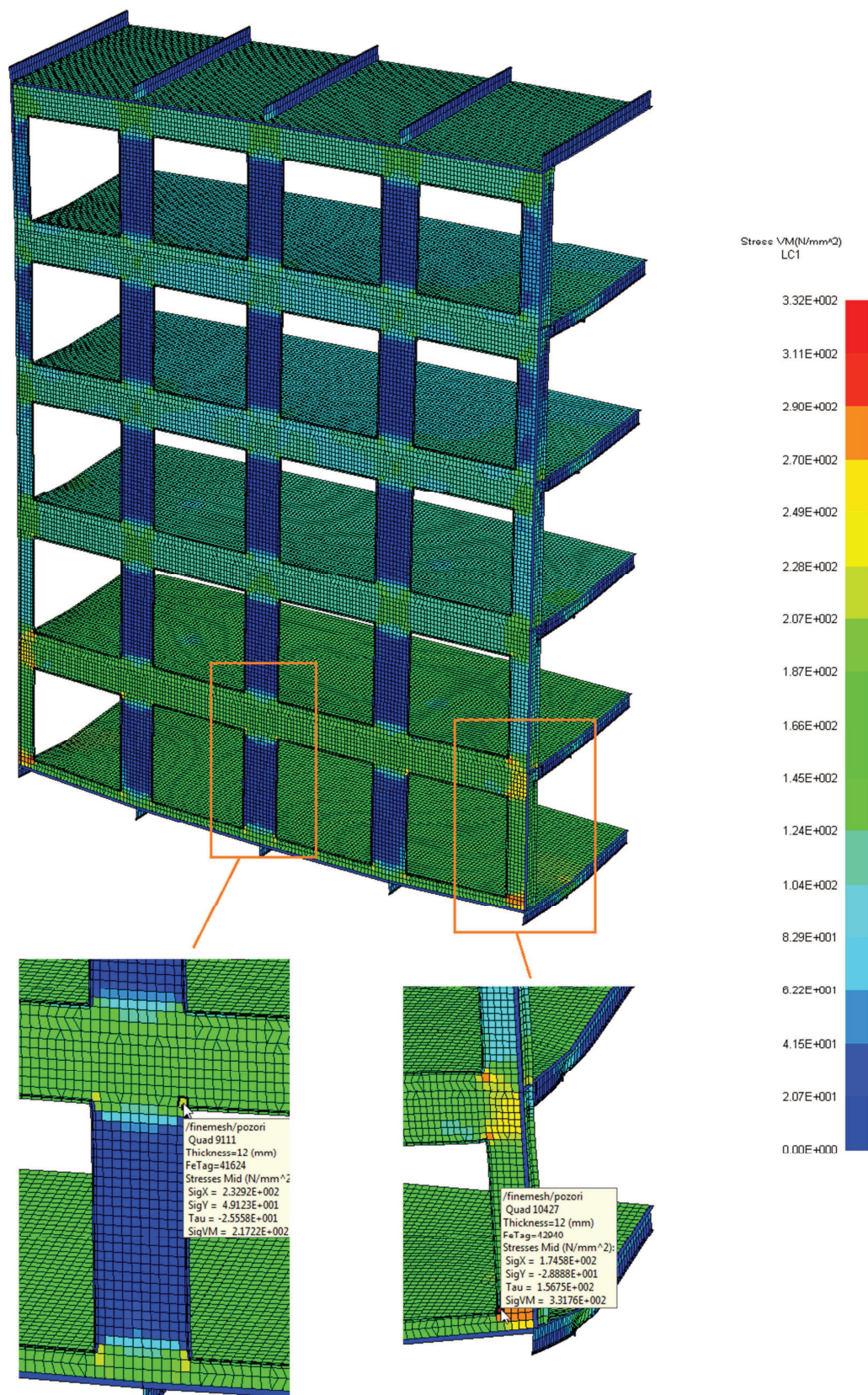
Opterećivanje detaljnog MKE modela sastoji se u prenošenju pomaka/rotacija iz globalnog modela kao rubnih uvjeta pomaka na ekvivalentnim čvorovima lokalnog detaljnog MKE modela. Na taj način deformacije globalnog modela postaju "opterećenje" pod-modela. Ovakav postupak poznat je kao metoda pod-modela (*top-down approach*). Pomaci dodatnih čvorova na granicama detaljnog modela koji leže između čvorova prenesenih sa globalnog modela dobiju se interpolacijom [9].

Odziv modela na lokaciji 0,5L ukazuje na veće koncentracije naprezanja u kutovima modela, dva su moguća razloga zbog takvog ponašanja modela. Prvi razlog je zbog upora koje se nalaze točno ispod krajeva finog MKE modela, a drugi su zbog krajeva modela i rubnih uvjeta. Raspored i veličine normalnih uzdužnih naprezanja finog MKE modela prate raspored i veličine normalnih uzdužnih naprezanja grubog MKE modela. Detalj na Slici # otkriva lokalno naprezanje od 331 N/mm^2 , što je puno veće i od granice razvlačenja korištenog materijala, ST24 kojemu je granica razvlačenja 235 N/mm^2 . Međutim prema pravilima DNV za direktnu analizu čvrstoće putničkih brodova [8], kriterij za veličinu vršnog naprezanja kod finih MKE modela iznosi:

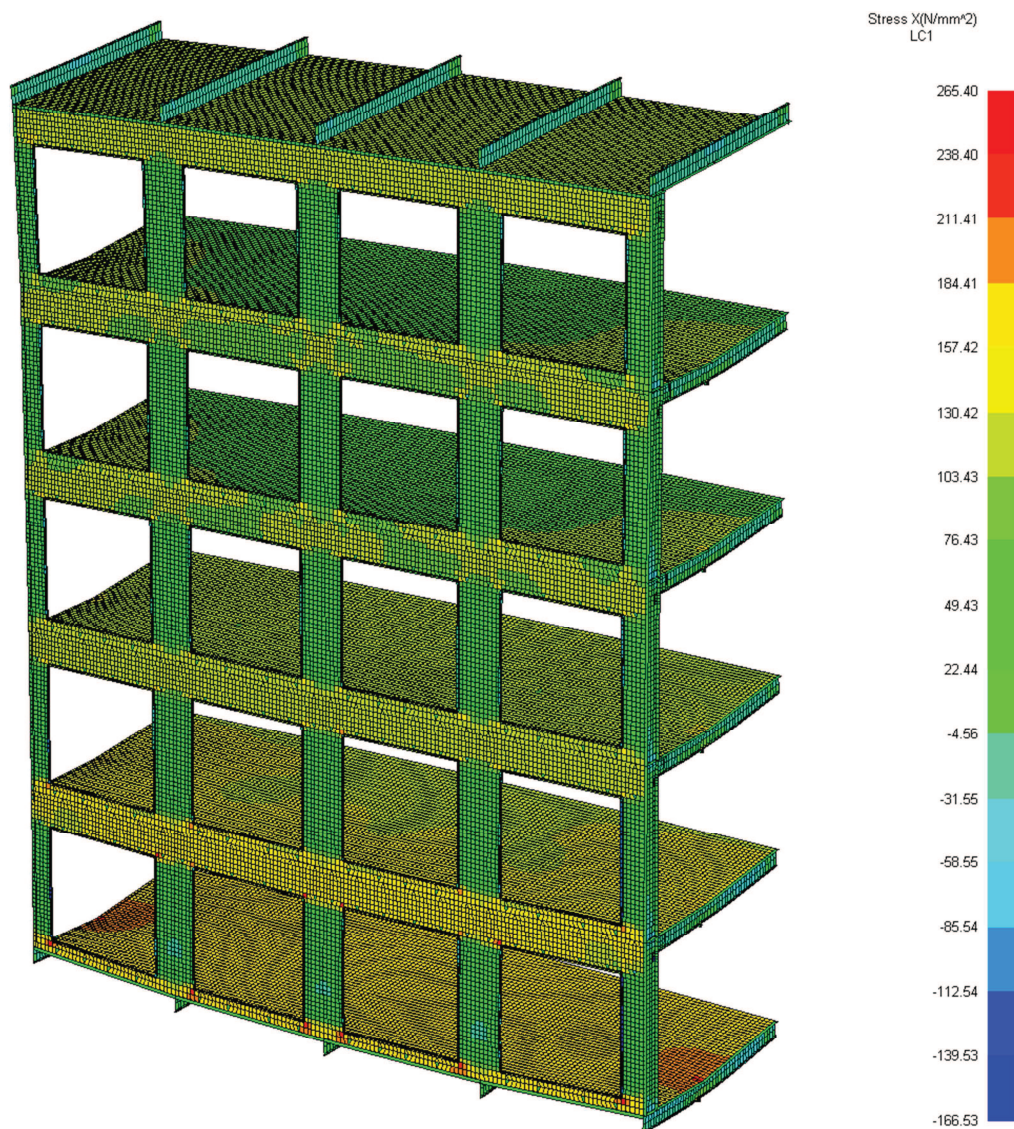
$$\sigma_e = 400f_1 \text{ [MPa]} \quad (6.4)$$

Što znači da je za ovaj slučaj dopušteno vršno naprezanje od 400 N/mm^2 .

Prema analizi otvora na lokaciji 0,5L nije potrebna uporaba čelika povišene čvrstoće, niti promjena debljine stjenke bočnih otvora, već lokalno podebljanje strukture iznad upora. Slikama 43 i 44 prikazana je distribucija naprezanja u bočnoj stjenci i kritični detalji.

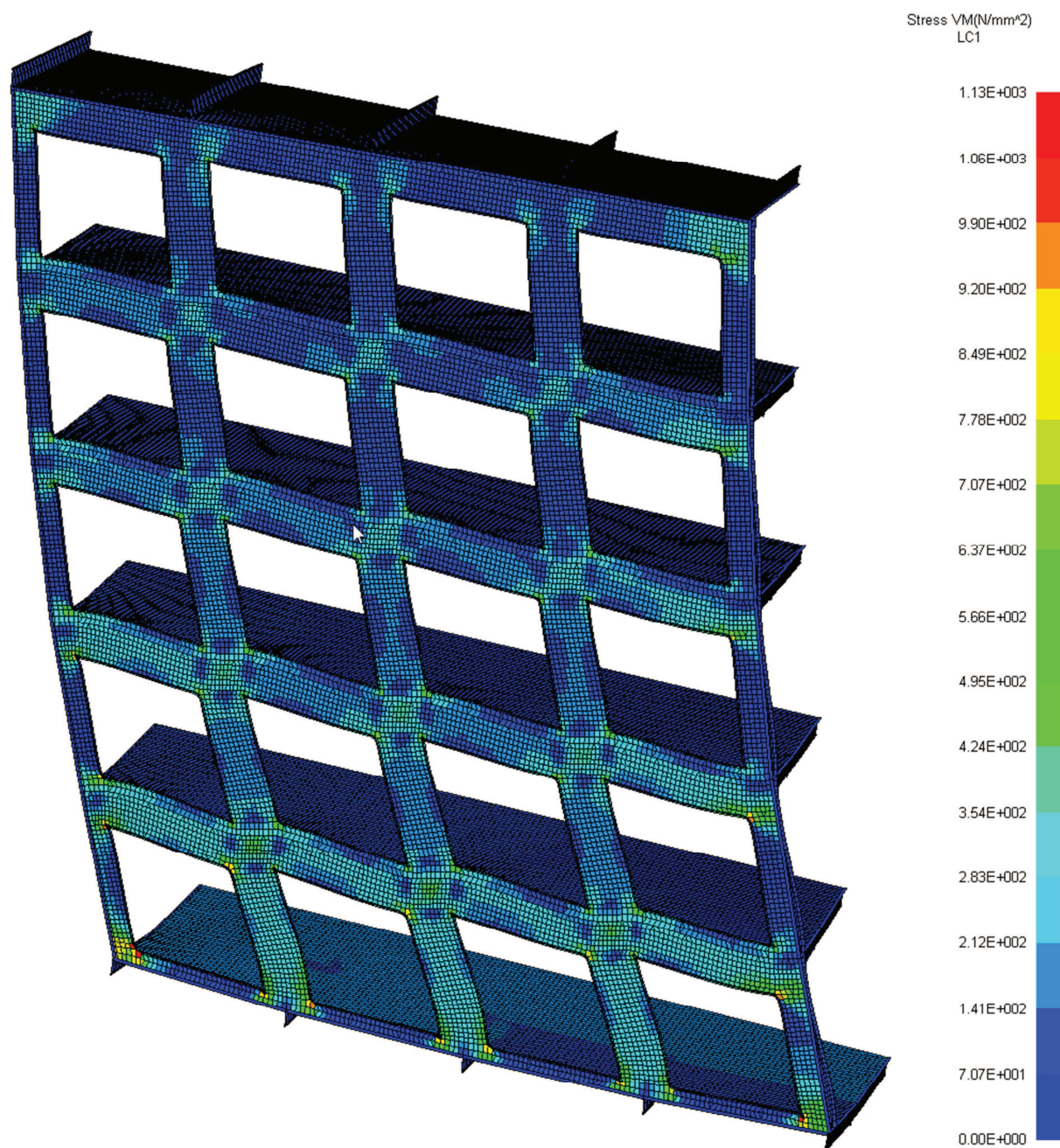


Slika 43. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i kritičnih detalja u području 0,5L za slučaj opterećenja LC1

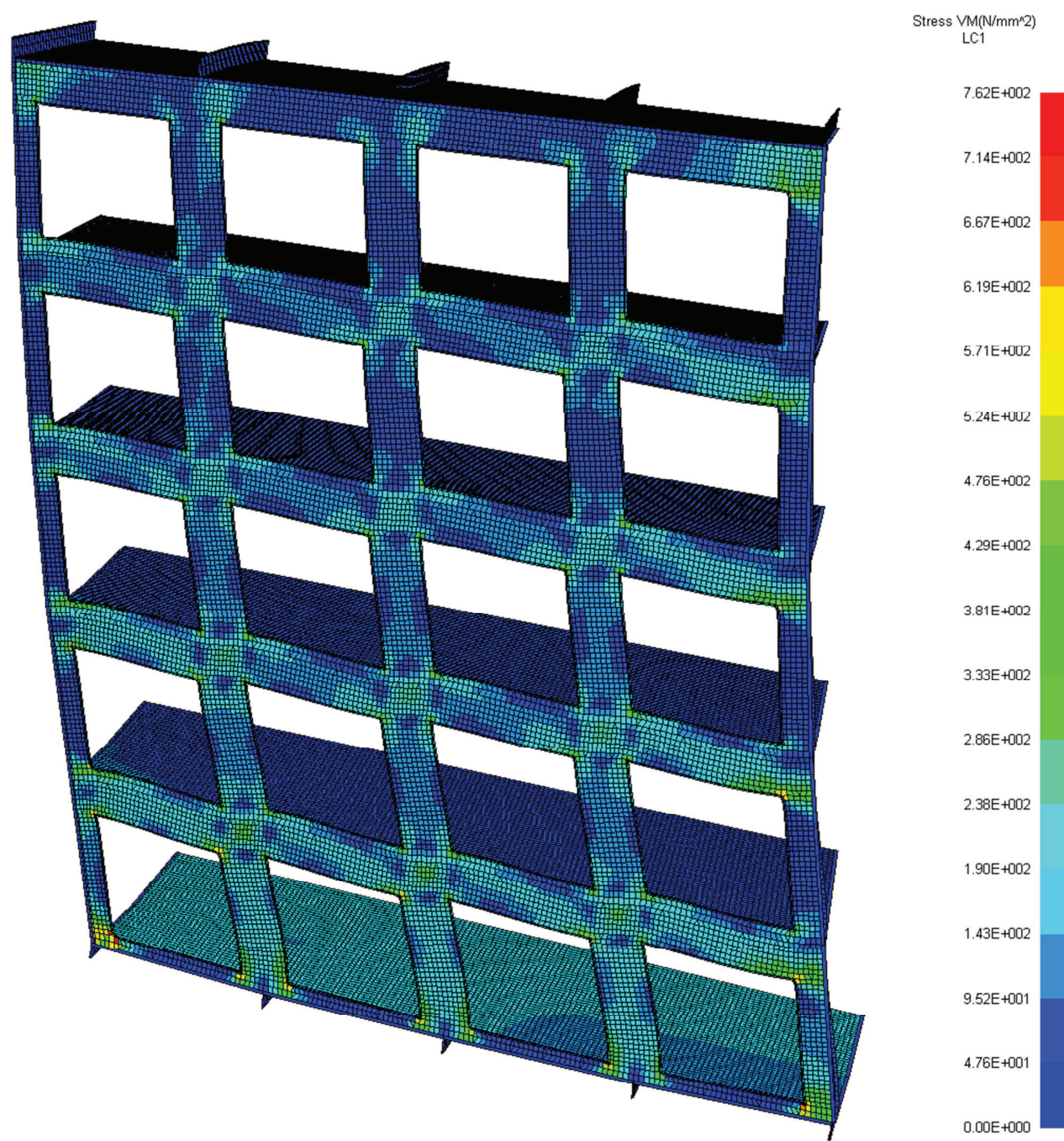


Slika 44. Prikaz distribucije uzdužnih normalnih naprezanja na području 0,5L konstrukcije u slučaju LC1

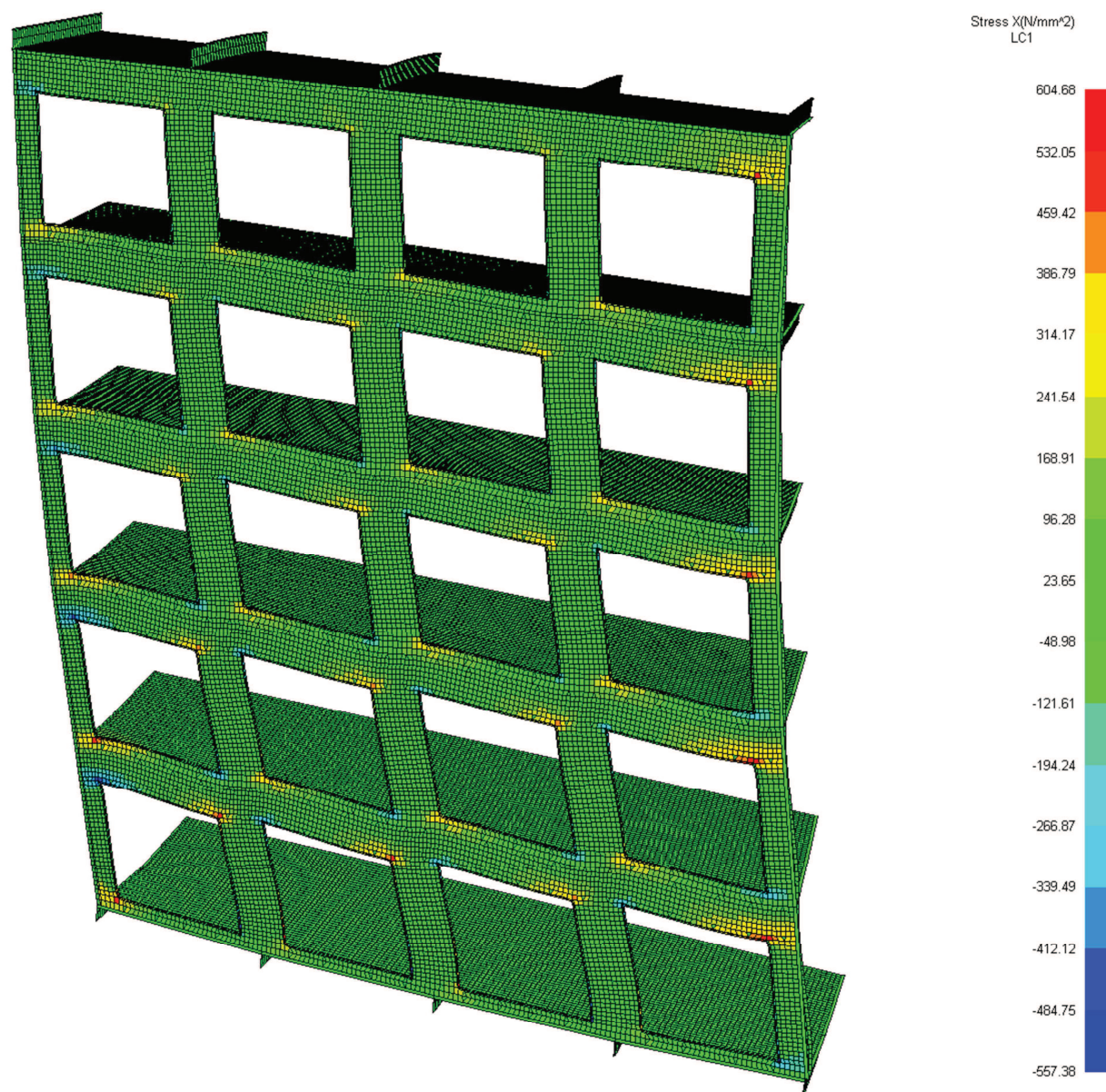
Odziv finog MKE modela na lokaciji na lokaciji 0,25L konstrukcije daje drugačija naprezanja, razlog tome su djelovanja velikih poprečnih sila na tom području konstrukcije. Zbog ponašanja gornjih paluba u slučaju LC1, palube smično opterećuju stjenku boka, i načina modeliranja otvora, nedostatak kružnih izreza u krajevima otvora, koncentracije naprezanja vidljive su u kutovima otvora, a u nekim slučajevima su nerealno visoka. Slikama 45 i 46 prikazane su distribucije ekvivalentnih naprezanja i koncentracije naprezanja kad je stjenka otvora debljine 12 mm, Slika 45, i 20 mm, Slika 46.



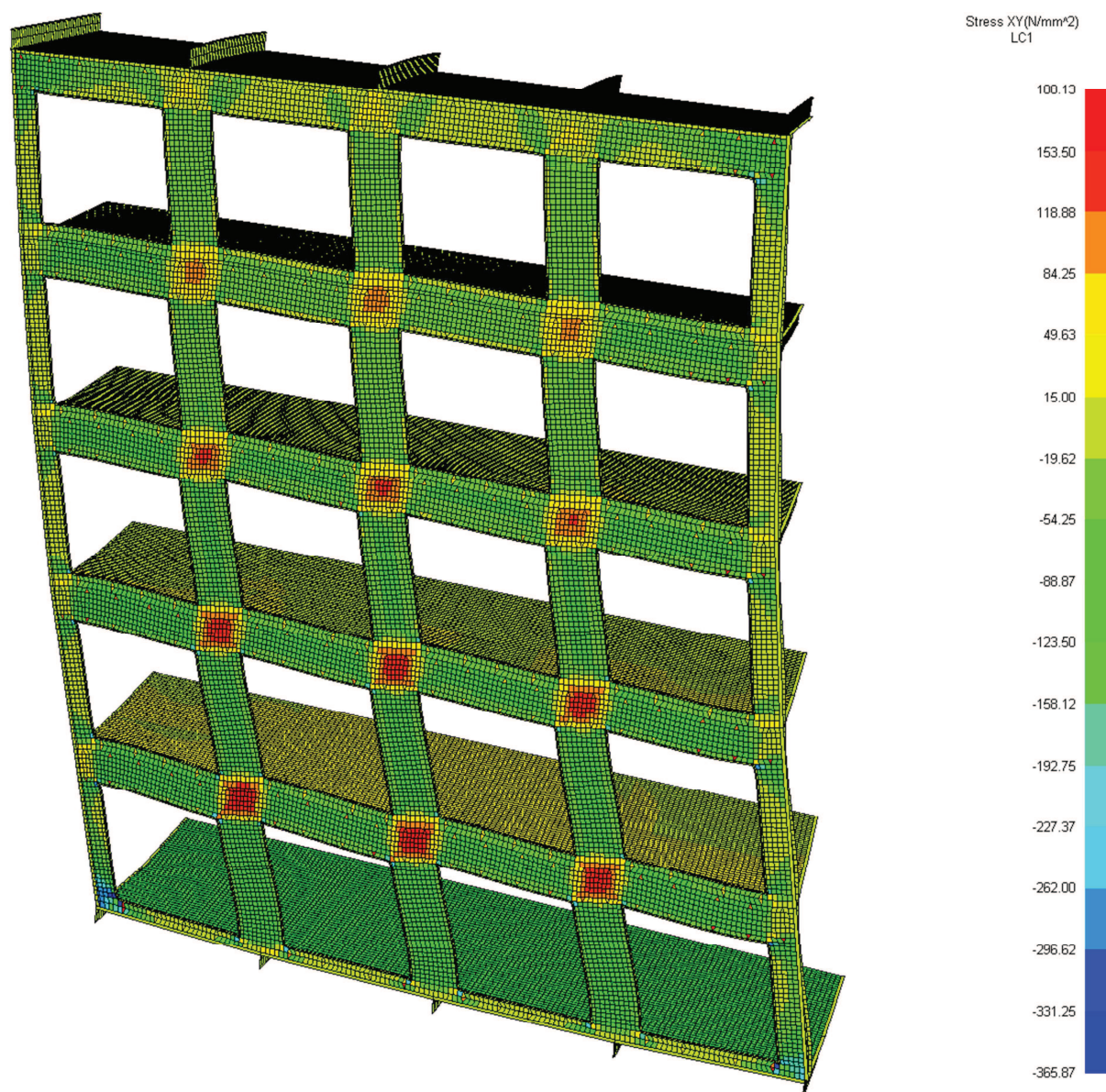
Slika 45. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 12 mm



Slika 46. Prikaz distribucije ekvivalentnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 20 mm

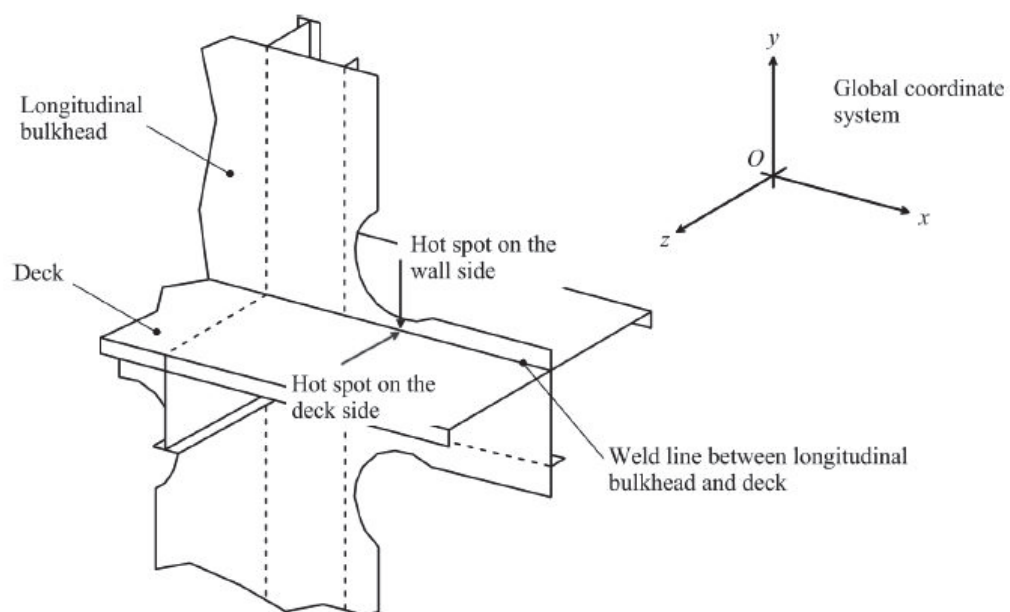


Slika 47. Prikaz distribucije normalnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stijenke od 20 mm



Slika 48. Prikaz distribucije smičnih naprezanja i koncentracija naprezanja na području 0,25L u slučaju LC1 za debljinu stjenke od 20 mm

Odziv modela debljine stjenke od 20 mm, Slike 46 do 48, na području 0,25L konstrukcije se također pokazao nepodoban. Unatoč smanjenju ekvivalentnih naprezanja povećanjem debljine s 12 mm na 20 mm, koncentracije naprezanja u kutovima su još velike. Kombinacija korištenja čelika povišene čvrstoće i promjene geometrije kuteva otvora poput visine praga i modeliranjem kružnih izreza kutova, vidi Sliku 49[10] i 50, su jedino pravo rješenje za ovakve probleme. Fini MKE model modeliran s tim detaljima bi sigurno pokazao veće smanjenje koncentracije naprezanja.



Slika 49. Tipična izvedba strukture otvora blizu mjesta koncentracija naprezanja[10]



Slika 50. Izvedbe otvora u proizvodnji

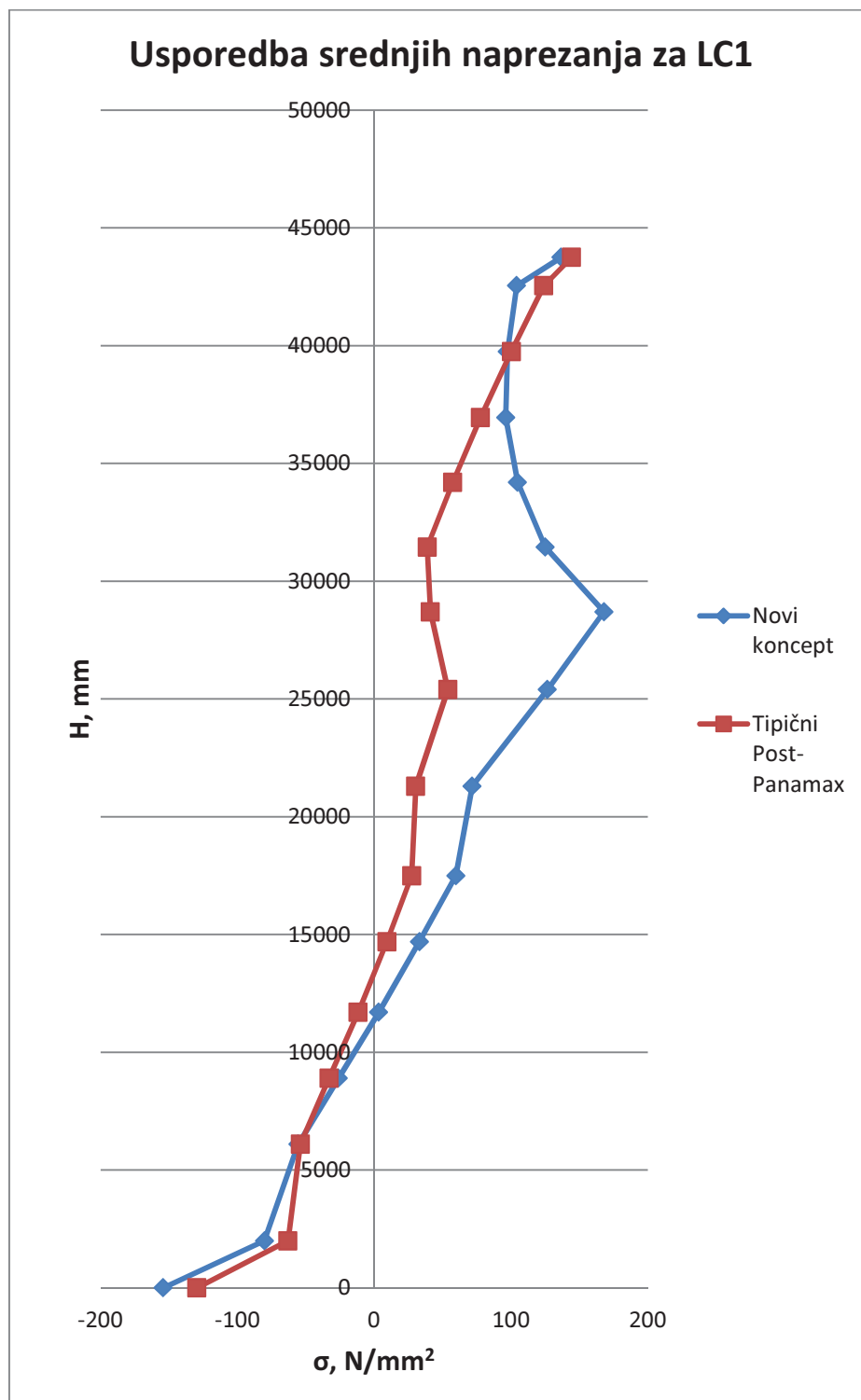
7. Usporedba prijedloga rješenja novog koncepta glavnog rebra sa dostupnim modelom tipičnog koncepta glavnog rebra post-Panamax broda

Usporedba dvaju konstrukcija je čisto strukturne prirode, topologija glavnog rebra, dobivena distribucija srednjih naprezanja, učinkovitost paluba nadgrađa, progibi te težina konstrukcije i njen raspored su uspoređivana svojstva. Lokacija usporedbe je na $L/2$ broda. Prijedlog rješenja novog koncepta uspoređuje se s konceptom glavnog rebra jednog tipičnog *Post-Panamax* broda s ciljem pronalaska specifičnosti obaju konstrukcija. Slikama 51 ÷ 53 i Tablicom 13 prikazane su usporedbe nekih svojstva koncepata.

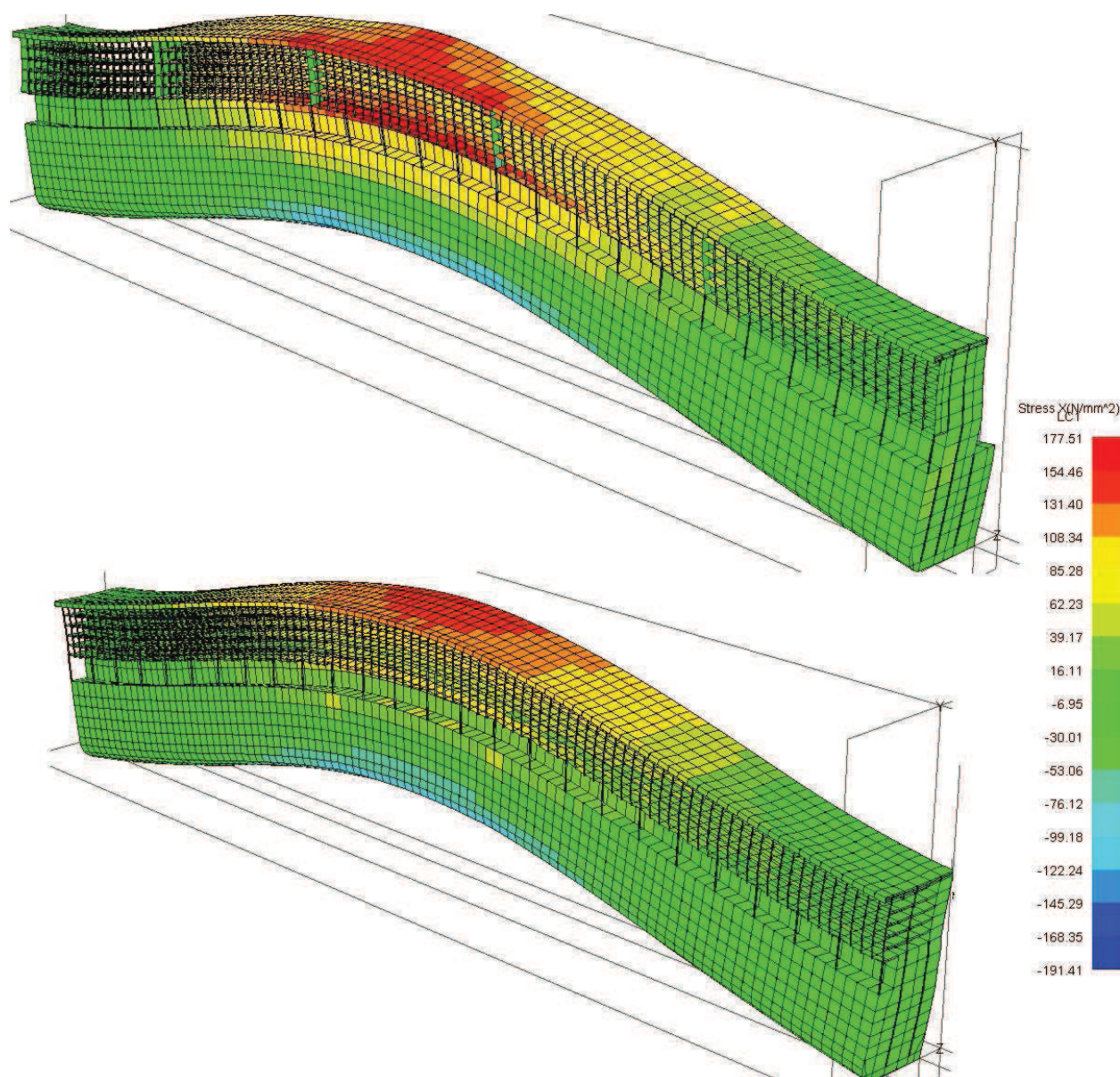
Topologija glavnog rebra dvaju koncepata, kao što je dijelom objašnjeno u poglavlju 2, se razlikuje u obliku nadgrađa i rasporeda strukturnih elemenata. Tipični *Post-Panamax* je zatvorena konstrukcija čija se naprezanja iz dna prenose oplatom bokom, oplatom recesa te uzdužnom pregradom i djelomično bočnom strukturom paluba iznad recesa na najgornje palube. Ukupno su četiri reda upora, jednako raspoređenih, koje s poprečnom strukturom podupiru palube. Novi koncept je u stilu broda *Oasis of the Seas*, nadgrađe se sastoji od dva „tornja“ koji počinju na palubi recesa, D7. Na palubi recesa, između tornjeva, se nalazi prazni prostor koji se može iskoristiti u razne svrhe. Tornjevi nemaju uzdužnu pregradu, te je očekivana manja efikasnost paluba nadgrađa, za razliku od tipičnog *Post-Panamax* broda. Kod ovakve strukture smična naprezanja, zbog nedostatka uzdužne pregrade, teku stjenkama nadgrađa. Ovdje projektirana struktura ima ukupno šest redova upora, od kojih su dva srednja reda najudaljenija. Skupa s poprečnom strukturom one podupiru palube.

Uspoređivanjem rezultata ispitivanja dvaju koncepata dolazi se do zanimljivih zapažanja. Dijagrama usporedbe srednjih naprezanja za LC1, LC2 nije prikazan jer su opterećenja manja nego kod LC1, prikazan na Slici 51 ukazuje na posljedice nedostatka uzdužne pregrade. Dok distribucija naprezanja tipičnog koncepta po cijeloj visini dobro aproksimira distribuciju naprezanja koju bi dobili primjenom teorije grede, kod novog koncepta takva distribucija se može prepoznati samo do palube D9. To govori da se paluba D9 kod novog koncepta izraženije ponaša kao paluba čvrstoće. Ovaj dijagram neposredno govori i moguću raspodjelu debljine limova i pripadajućih strukturnih elemenata.

Slika 55 tu raspodjelu detaljnije prikazuje, te se može primijetiti razlika u rasporedu debljina. Paluba D9 je manje debljine nego očekivane kod novog koncepta nego kod tipičnog koncepta, razlog tome je ušteda težine korištenjem jačih uzdužnjaka.

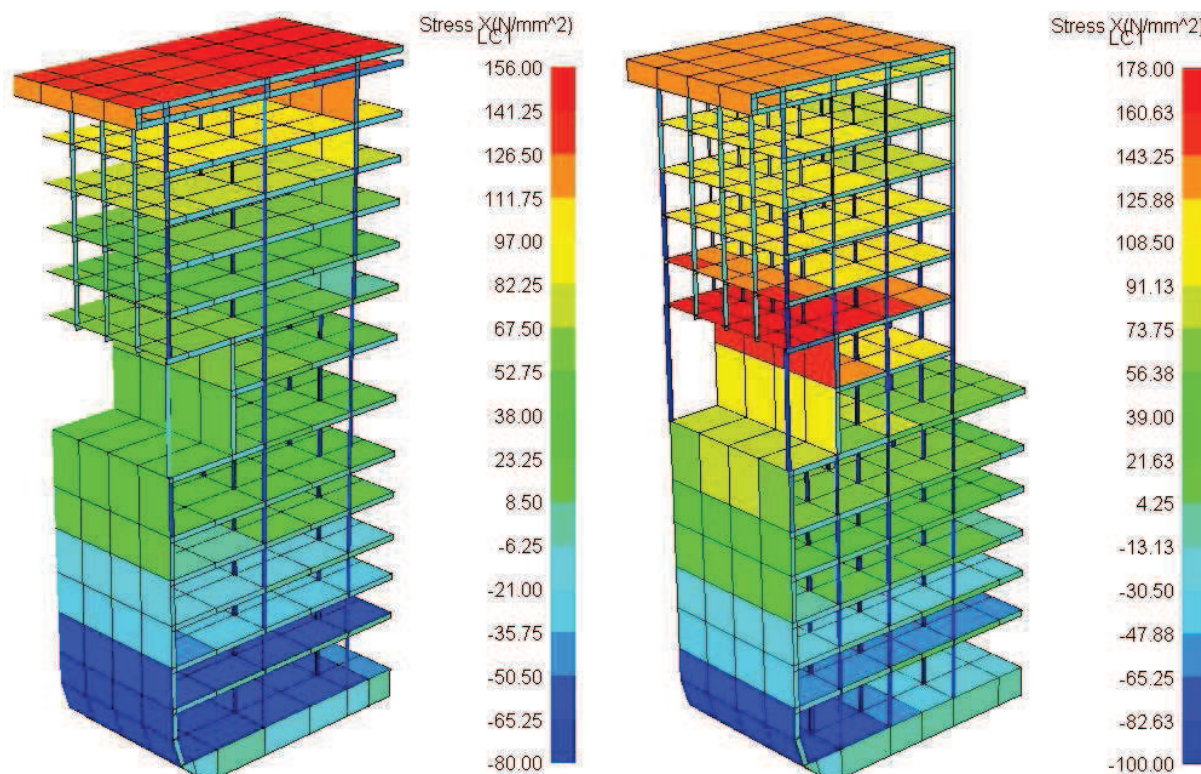


Slika 51. Prikaz usporedbe distribucije napreznja dvaju koncepata za LC1



Slika 52. Prikaz usporedbe distribucije uzdužnih normalnih naprezanja u slučaju LC1 na modelima dvaju koncepta, gore je *novi koncept*, dolje je konvencionalni koncept

Uspoređujući stupnjeve učinkovitosti, Tablica 13, tipični koncept ima veći stupanj učinkovitosti nadgrađa (oko 1) nego novi koncept (oko 0,7). Uzrok tome je tzv. „*Shear lag*“, vidi Sliku 53. Pošto na spoju palube i nadgrađa uzdužna normalna naprezanja moraju biti ista, pojavljuje se smično naprezanja između bočne stijenke nadgrađa i oplata palube koje uzrokuje deformacije palube. Zbog toga uzdužni pomaci blizu boka nadgrađa *kasne*, što dovodi do neuniformne distribucije normalnih uzdužnih naprezanja po oplati palube.



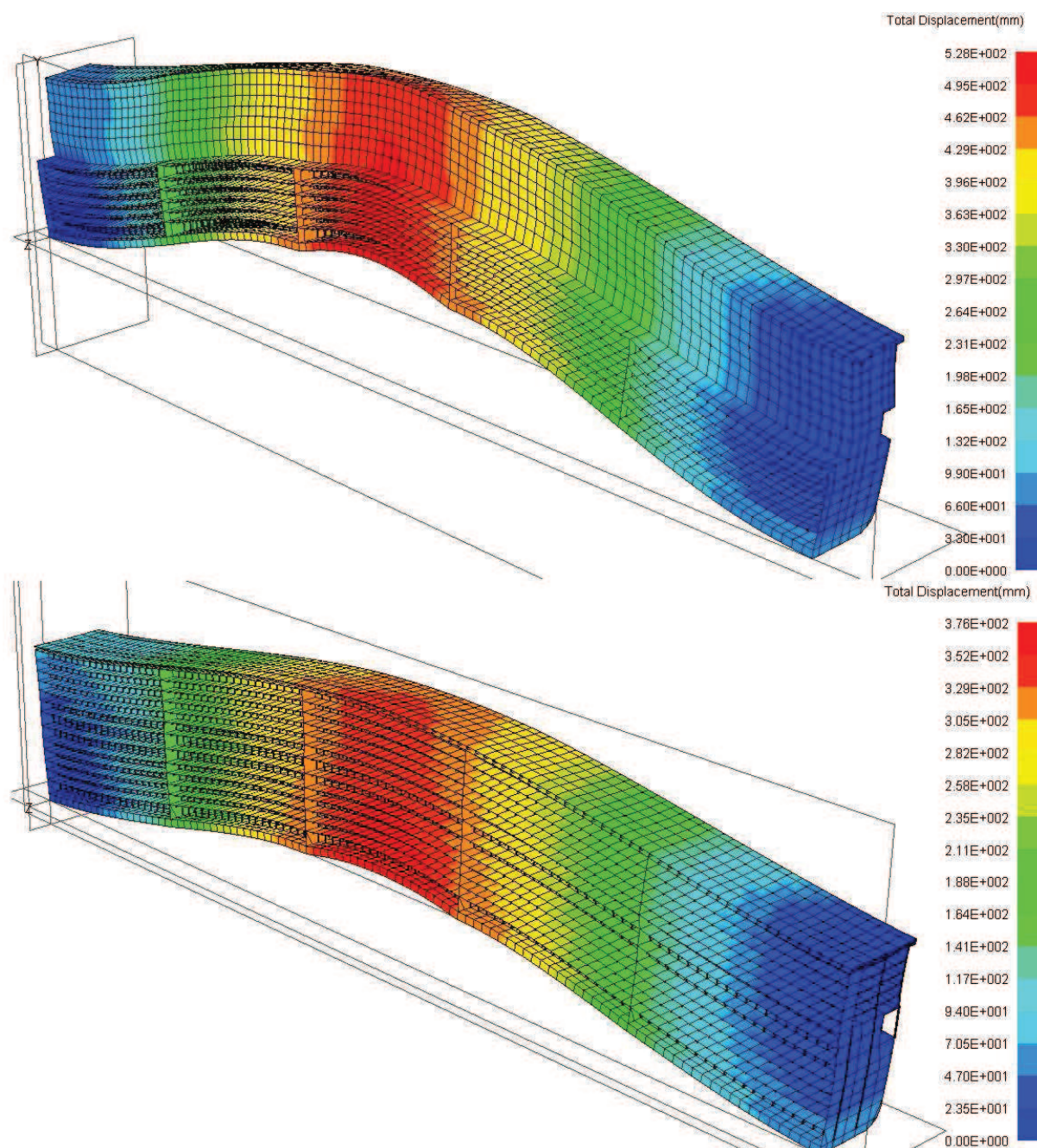
Slika 53. Prikaz efekta *Shear lag*, lijevo je konvencionalni koncept, desno je predloženi novi koncept

Radi boljeg uvida u efekt *Shear lag*-a na gornjoj slici mjerila naprezanja su skalirana.

Tablica 13. Usporedba stupnjeva učinkovitosti nadgrađa dvaju koncepata

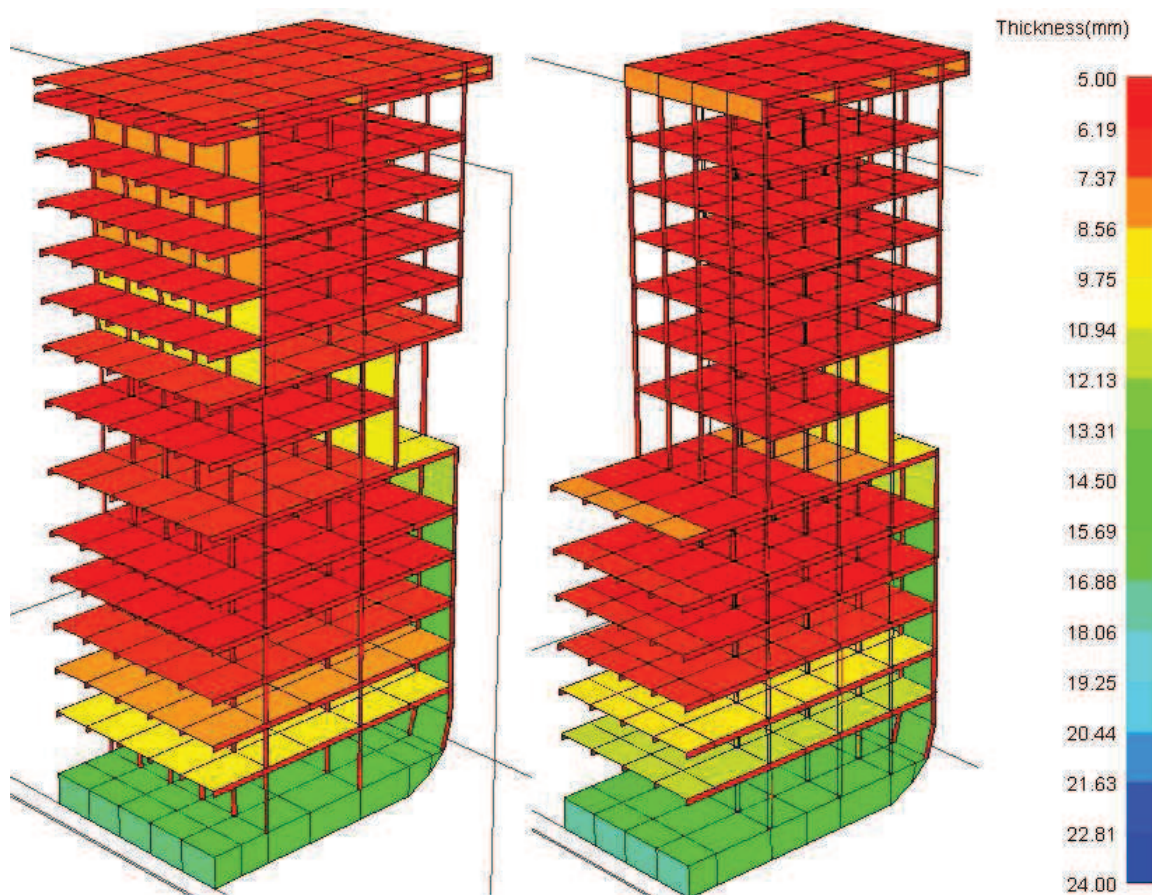
Učinkovitost nadgrađa novog koncepta				
LC	σ 0% [N/mm ²]	σ 100% [N/mm ²]	σ FEM [N/mm ²]	η
1	363,81	84,86	168,01	0,7019
2	-190,07	-44,33	-87,57	0,7033
			η srednje =	0,7026
Učinkovitost nadgrađa tipičnog koncepta				
LC	σ 0% [N/mm ²]	σ 100% [N/mm ²]	σ FEM [N/mm ²]	η
1	329,89	49,53	41,07	1,0302
2	-172,35	-25,88	-23,61	1,0155
			η srednje =	1,0228

Usporedba deformacija konstrukcija, u slučaju LC1, je prikazana na Slici 54, a vrijednosti najvećih deformacija su, za konvencionalni koncept $\delta = 376$ mm i za predloženi koncept $\delta = 528$ mm. Očito je da je predloženi koncept elastičnija konstrukcija od dvije.



Slika 54. Usporedba deformacija, gore je prikazana deformacija predloženog koncepta, dolje je prikazana deformacija konvencionalnog koncepta

Kad bi se usporedile mase konstrukcija, prijedlog rješenja konstrukcije novog koncepta je lakši, 9934,32 t, nego masa konstrukcije tipičnog koncepta, 10655,8 t. Vrijednosti ovih masa treba uzeti sa *rezervom* zbog prirode modela, objašnjeno u poglavlju 4. Međutim vertikalna težišta ovih konstrukcija bi se već mogao uzeti u obzir, te za prijedlog rješenja nove konstrukcije ono iznosi 15,3 m, a za tipičnu konstrukciju iznosi 18,6 m. Nedostatak središnje konstrukcije novog koncepta uvelike utječe na ove vrijednosti, kao i na izvijanje dvodna. Zbog tog nedostatka biaksialno izvijanje dvodna novog koncepta je jače izraženo, vidi Sliku 34, te se uporama oblik izvijanja prenosi na tornjeve.



Slika 55. Prikaz usporedbe distribucije debljina dvaju koncepata, lijevo je tipični koncept, desno je novi koncept

8. ZAKLJUČAK

Kroz diplomski rad je razmatrano nekoliko novih koncepata geometrije i topologije glavnog rebra velikog broda za kružna putovanja, od kojih je odabran jedan koji se analizirao i usporedio s dostupnim modelom konvencionalne topologije i geometrije glavnog rebra. Za predloženi koncept dimenzionirali su se strukturni elementi proračunom po Pravilima DNV, te je napravljena analiza učinkovitosti nadgrađa u s obzirom na veličinu bočnih otvora. Rezultati naprezanja i deformacija dobiveni su metodom konačnih elemenata na razini grubog globalnog modela. Model s omjerom otvora 0.73 i debljinom stijenke od 12 mm odabran je kao najrealističniji model pošto veličina takvog otvora odgovara standardnom balkonskom otvoru. Za taj model prepoznati su nepodobni elementi te je izvršeno redimenzioniranje, na temelju čega je dan prijedlog izmjena strukturnih elemenata kojom konstrukcija zadovoljava kriterije podobnosti.

Modeliranje otvora u bokovima je provedeno prema *Fransmanovoj* metodi membrane ekvivalentne debljine koja je pokazala zadovoljavajuću točnost za ovu fazu projektiranja s oko 8% srednje greške. Analiza senzitivnosti veličine otvora i debljine stijenke ukazala je na to da veličina otvora ima znatno veći utjecaj na efektivnost nadgrađa nego sama debljina stijenke. Rezultati finog MKE modela prozora, dobiveni metodom pod-modela, ukazali su na potrebu pažljivog projektiranja stijenki otvora, posebno oblikovanje kuteva, zbog njenog velikog utjecaja u uzdužnoj čvrstoći ovakvog tipa broda. Izrazito velike koncentracije naprezanja javljaju se na poziciji oko $0.25L$ gdje je globalna poprečna sila najveća.

U radu je dana usporedba analize uzdužnih normalnih naprezanja i deformacija predložene strukture s analizom uzdužnih normalnih naprezanja i deformacija konvencionalne strukture unutar $0,4L$ za obje konstrukcije. Usporedbom primarnih naprezanja vidljiva je razlika u distribucijama naprezanja, a najveće je na palubi D9 koja se kod predloženog koncepta izraženije ponaša kao paluba čvrstoće, dok palube iznad djelomično sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći. Efektivnost nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći novog koncepta je oko 0.7 dok je konvencionalnog oko 1.0. Razlika u deformacijama nam ukazuje na to da je predloženi koncept elastičniji od konvencionalnog koncepta, a kod predložene konstrukcije izražen je prijenos oblika deformacije dvodna na palube iznad sve do najgornje palube, te je ovakvo ponašanje konstrukcije zapaženo u oba slučaja opterećenja.

Zbog nepostojanja uzdužne pregrade kod gornjih paluba, za razliku od konvencionalnog koncepta, kod predloženog koncepta prijenos smičnih sila se ostvaruje preko oplata bokova oko otvora što uzrokuje koncentraciju naprezanja u tim dijelovima konstrukcije. Utjecaj nedostatak uzdužne pregrade na gornjim palubama, kao struka nosača, u konstrukcijskim čimbenicima je evidentan, međutim takva konstrukcija je lakša i ima niže vertikalno težište mase što poboljšava pomorstvene karakteristike broda.

Pošto je u sklopu rada provedena usporedba uzdužnih čvrstoća dvaju koncepata, usporedba poprečne čvrstoće u slučaju nesimetričnog opterećenja (*eng. racking*) bi upotpunilo ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] Kulovaara, H. "Nurturing Innovation in Cruise Ship Design", 11th International Marine Design Conference-IMDC 2012, Vol.1, pp.3-18, Glasgow, Scotland.
- [2] Andrić, J. "Metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe", doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
- [3] Levander, K. Kvaerner Masa-Yards Technology „New challenges in cruise ship design Optimizing the panamax size ship“ Seatrade Cruise Shipping Convention 2001
- [4] ..., Det Norske Veritas: „Rules for Classification of Ships, Newbuildings: Hull Structural Design – Ships with Length 100 Meters and Above“, July 2011.
- [5] Daničić, D. „Analiza uzdužne čvrstoće velikog putničkog broda za kružna putovanja u konceptualnoj fazi projekta“, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [6] ..., MAESTRO Version 8.9.3: „Program documentation“, Proteus Engineering, Stevensville, MD, USA.
- [7] Hughes, O. F.: „Ship Structural Design: A Rationaly-Based, Computer-Aided Optimization Approach“, John Wiley & Sons, New York, 1983
- [8] ..., Det Norske Veritas: Classification Notes No. 31.8, Direct Strength Analysis of Hull Structures in Passenger Ships, October 2007.
- [9] Andrić, J., Magistarski rad: "Procedura projektiranja brodskih konstrukcija putničkih i Ro-Ro brodova", Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2003.
- [10] 18th International Ship And Offshore Structures Congress, „Report of Committe III.2 Fatigue and Fracture“, September 2012.

Prilog

Prilog A – Proračun u MS Excell

Prilog B – Nacrt glavnog rebra

Prilog A

Proračun u MS Excell-u

Osnovne dimenzije

L	273,00	m
B	38,60	m
H	43,75	m
S	2730,00	mm
T	7,07	m
Cb	0,60	

Moment inercije Pt2.C303

$$I = 3C_w(L^3)B(C_b + 0,7)$$

$$I = 32496988430.4693 \text{ cm}^4$$

Moment otpora Pt2.C303

$$Z_0 = (C_w / f_1) L^2 B (C_b + 0,7)$$

$$Z_0 = 39678862.5524655 \text{ cm}^3$$

Momenti savijanja Pt2.B106, B200

sagg

wave

B200

$$M_{wo} = -4826018.75417915 \text{ kNm}$$

ukupni

moment

$$M_{ts} = -4826018.75417915 \text{ kNm}$$

hogg

stillwater

B106

$$M_{so} = 3830441.4587366 \text{ kNm}$$

wave

$$M_{wo} = 3847315.65018477 \text{ kNm}$$

ukupni

moment

$$M_{tw} = 7677757.10892137 \text{ kNm}$$

tlakovi

prema Pt. 3 Ch. 1 Sec. 4 B201

dno

$$p_1 = 10T + \text{pdp}$$

$$\text{pdp} = 31.2677035112812 \text{ kPa}$$

$$p_1 = 102 \text{ kPa}$$

bok

$$\text{pdp} = \text{pl} + 135 \cdot y / (75 + B) - 1,2 \cdot (T - z)$$

$$p_1 = 10T + \text{pdp}$$

ispod

WL

z [m]	p1 [kPa]	pdp [kPa]	y [m]
0,00	109,21	38,43	15,64
2,00	94,75	44,07	18,36
4,00	78,27	47,58	19,30
6,10	59,79	50,10	19,30

iznad

WL

$$p_2 = a(\text{pdp} - (4 + 0.2ks)h_0)$$

$$p_{2\min} = 6.25 + 0.025L$$

$$p_{2\min} = 13.075 \text{ kPa}$$

h [m]	T [m]	h0 [m]	a	pdp [kPa]	p2 [kPa]
8,90	7,07	1,83	1,00	51,26	43,21
11,70	7,07	4,63	1,00	51,26	30,89
14,70	7,07	7,63	1,00	51,26	17,69
17,70	7,07	10,63	1,00	51,26	4,49

palube

Weather deck

prema Pt. 3 Ch. 1 Sec. 4 B201

$$p_{2\min} = 5 \text{ kN/m}^2$$

prema deck cargo

$$p_2 = 1,75(g_0 + 0.5a_v) = 2.71 \text{ kPa}$$

**accomodation
deck**

$$p_5 = 0.35(g_0 + 0.5a_v) = 3,99 \text{ kN/m}^2$$

$$a_0 = 3C_w/L + C_V \cdot C_V$$

1

$$C_V = \min = 0,8$$

$$C_V = \max = 0,2$$

$$a_0 = 0.27659$$

$$a_v = k_v \cdot g_0 \cdot a_0 / C_B$$

$$k_v = 0,7$$

$$g_0 =$$

$$a_v = 3,165574$$

$$9,81$$

prema p3 ch1 sec4

C400

$$p_H(g_0 + a_v)$$

$$p = 4.54145 \text{ kN/m}^2$$

$$p_H = 0.35 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{2\min} = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{uzeto } p_{2\min} = 5 \text{ kN/m}^2$$

dno

pt.6.C200; pt6. C300

kobilica

$$b > 800 + 5L = 2165 \text{ mm}$$

$$\text{uzeto } b = 2200 \text{ mm}$$

$$t = 7 + (0,05L_1 / \sqrt{RTf_1}) + t_k$$

$$f_1 = 1$$

$$t = 21.65 \text{ mm}$$

$$t_k = 1 \text{ mm}$$

$$\text{uzeto } t = 22 \text{ mm NV-NS}$$

oplata dna

$$s/l = 0,24908425 \rightarrow$$

$$ka=1$$

$$s= 0.68 \text{ m}$$

$$\sigma= 120$$

$$\text{N/mm}$$

$$tk= 1\text{mm}$$

$$f1= 1$$

$$\sigma=120f1 \text{ when longitudinals within } 0,4L$$

$$t=15,8*ka*s*\sqrt{p}/\sqrt{\sigma}+tk$$

$$t \text{ min}=5+ 0,04L/\sqrt{f1} +tk$$

$$tmin=16.92 \text{ mm}$$

$$tmin= 17 \text{ mm NV-NS}$$

Od koblice do B/4

$$t= 10.905 \text{ mm}$$

uzeto

$$t=tmin=17 \text{ mm NV-NS}$$

Od B/4 do uzvoja

$$t=$$

$$t= 11.25 \text{ mm}$$

uzeto

$$t=tmin= 17 \text{ mm NV-NS}$$

uzvoj

$$b > 800 + 5L = 2178, 65 \text{ mm}$$

$$\text{uzeto } b=2200 \text{ mm}$$

$$t=15,8*ka*s*\sqrt{p}/\sqrt{\sigma}$$

$$G= 160$$

$$tk= 1$$

$$\text{mm}$$

$$t= 14 \text{ mm}$$

uzeto

$$t= 14 \text{ mm NV-32}$$

visina dvodna

$h=1000 \cdot B/20$ min 760 mm ; max 2000 mm

$h=1930$
mm

uzeto $h=2000$
mm

inner bottom pt.6 C400

$$t=15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma}$$

$p_{min}=5$
Pa $t=3,03$ mm

$\sigma=140 f_1$ $f_1=1$
 $\sigma=140$ N/mm²
 $k_a=1$

$t_k=1$ mm
 $t_{min}=t_0+0,03L/\sqrt{f_1}+t_k$
 $t_0=5$ mm
 $t_{min}=14,19$ mm

uzeto $t=14,5$
mm

bokovi Pt.7 C100

z označava visinu od osnovice

$$t=15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

zone		p	σ	k_a	t_k [mm]	t [mm]	uzet t [mm]	tip materijala
2-4	m	109,1184	140	1	0	8,838802	9	NV-NS
4-6,1	m	94,75079	140	1	0	8,033295	8	NV-NS
6,1-8,9	m	59,78787	140	1	0	7,021154	7	NV-NS
8,9-11,7	m	43,21291	140	1	0	5,969098	6	NV-NS
11,7-14,7	m	30,89291	140	1	0	5,046978	5	NV-NS
14,7-17,5	m	17,69291	140	1	0	3,819457	4	NV-NS

prema sec 7 C102

$$k=k_{\min}=0.01$$

$$t=5+k \cdot L/\sqrt{f_1}+t_k$$

$$t_k=0 \text{ mm}$$

$$t_{\min}=7.73 \text{ mm}$$

uzeto $t_{\min}=8 \text{ mm NV-NS}$

Za vojeve sve do 4,6 m iznad T je prema Sec7 C102 debljina t min

zone	t [mm]	k	tip materijala
od 2-11,6 m	16	0,04	NV-NS
11,6-13,9 m	14,5	0,035	NV-NS
13,9-16,2 m	13,5	0,03	NV-NS
16,2 -18,5	12	0,025	NV-NS
18,5-20,8	10,5	0,02	NV-NS
20,8-23,1	9	0,015	NV-NS
23,1 >	8	0,01	NV-NS

za debljine oplata uzete su tmin vrijednosti prema Sec. 7 C102

završni voj

$$b=800+5L \quad b_{\max}=1800 \text{ mm}$$

$$b=2165 \text{ mm}$$

uzeto $b=b_{\max}=1800 \text{ mm}$

palube

Strength deck C100, Sec 8

$$t = 15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

$$k_a = 1$$

$$p = 5 \text{ kPa}$$

$$t_k = 1 \text{ mm}$$

$$t = 3.19 \text{ mm}$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$\sigma = 120 f_1 = 120 \text{ N/mm}^2$$

$$t_{\min} = t_0 + k \cdot L / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$t_0 = 5 \text{ mm}$$

$$t_k = 0 \text{ mm}$$

$$k = 0 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 5 \text{ mm NV-NS} \quad \textbf{uzeto}$$

accomodation decks

prema C200 Sec.8

$$t = 15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

$$t_{\min} = t_0 + k \cdot L / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$p = 5 \text{ kPa}$$

$$k_a = 1$$

$$t_0 = 5 \text{ mm}$$

$$t_k = 0 \text{ mm}$$

$$t = 1,899 \text{ mm}$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$k = 0$$

$$\sigma = 160 f_1 = 160 \text{ N/mm}^2$$

$$t_{\min} = 5 \text{ mm}$$

$$\textbf{uzeto} \quad t = 5 \text{ mm NV-NS}$$

**recess
deck**

prema C200 Sec. 8

$$t = 15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

$$t_{\min} = t_0 + k \cdot L / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$\sigma = 160 f_1 = 160 \text{ N/mm}^2$$

$$t_0 = 5 \text{ mm}$$

$$k_a = 1$$

$$t_k = 0 \text{ mm}$$

$$p_0 = 22,70726 \text{ kPa}$$

$$k = 0,02$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$t_{\min} = 10,46 \text{ mm}$$

uzeto $t_{\min} = 10.5 \text{ mm NV-NS}$

Jaki nosači dna

Hrptenica

$$t = 15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

$$t_{\min} = 6 + k / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$p = 10h_s + p_0$$

$$p = 45 \text{ kPa}$$

$$p_{\min} = 10T = 70,7 \text{ kPa}$$

$$p_0 = 25 \text{ kPa}$$

$$k_a = 1$$

$$t_k = 1,5 \text{ mm}$$

$$h_s = 2 \text{ m}$$

$$k = 0,04 \cdot L = 10,92$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$t_{\min} = 18,42 \text{ mm}$$

$$\sigma = 130 f_1 = 130$$

$$t = 9,4232 \text{ mm}$$

uzeto

$$t = 18,5 \text{ mm NV-NS}$$

Ostali jaki nosači

$$t_{\min} = 6 + k / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$t = 15,8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p} / \sqrt{\sigma} + t_k$$

$$p = 10h_s + p_0$$

$$p = 45 \text{ kPa}$$

$$p_{\min} = 10T = 70,7 \text{ kPa}$$

$$p_0 = 25 \text{ kPa}$$

$$k_a = 1$$

$$t_k = 1,5 \text{ mm}$$

$$h_s = 2 \text{ m}$$

$$k = 0,02 \cdot L = 5,46$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$t_{\min} = 12,96 \text{ mm}$$

$$\sigma = 130 f_1 = 130 \text{ N/mm}^2$$

$$t = 9,4232 \text{ mm}$$

uzeto

$$t = 13 \text{ mm NV-NS}$$

**ukrepe
dna**

$$Z = (83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k) / \sigma$$

$l = 2,73 \text{ m}$
 $s = 0,68 \text{ m}$
 $\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$
 $p = 102 \text{ kN/m}^2$

$$Z = 467,669 \text{ cm}^3$$

$W_k = 1 + 0,06 \cdot t_k$
 $t_k = 1,5$
 mm

$w_k = 1,09$ **prema Sec.3
C1004**

**ukrepe pokrova
dvodna**

$$Z = (83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k) / \sigma$$

$l = 2,73 \text{ m}$
 $s = 0,68 \text{ m}$

$$Z = 324,159 \text{ cm}^3$$

$p = 70,7 \text{ kN/m}^2$
 $p = p_{\min} = 10 \text{ T}$
 $\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$

$W_k = 1 + 0,06 \cdot t_k$ $t_k = 1,5 \text{ mm}$
 $w_k = 1,09$ **prema Sec.3 C1004**

ukrepe uzvoja

Pt.3.Sec7 C300

$$Z = (83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k) / \sigma$$

$$l = 2,73 \text{ m}$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$Z = 500,727 \text{ cm}^3$$

$$p = 109,21 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$W_k = 1 + 0,06 \cdot t_k$$

$$t_k = 1,5 \text{ mm}$$

**prema Sec.3
C1004**

$$w_k = 1,09$$

ukrepe boka

Pt.3.Sec7 C300

$$Z = (83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k) / \sigma$$

$$l = 2,73 \text{ m}$$

$$w_k = 1,00 \rightarrow \text{prema Sec.3 C1004} \quad W_k = 1 + 0,06 \cdot t_k ; t_k = 0$$

zone	naprezanja	Moment otpora		
	$\sigma =$	s	p	Z=
	N/mm ²	m	kN/m ²	cm ³
2-4	100,00	0,70	109,12	447,21
4-6	100,00	0,70	94,75	358,86
6-8,9	100,00	0,70	59,79	274,13
8,9-11,7	100,00	0,70	43,21	198,13
11,7-14,7	100,00	0,70	30,89	156,22
14,7-17,7	100,00	0,70	17,69	81,12
17,7---	100,00	0,70	4,49	60,26

ukrepe paluba

Sec.9 C200

$$Z = (83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k) / \sigma$$

$$l = 2,73 \text{ m}$$

$$s = 0,68 \text{ m}$$

$$p = 22,71 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma = 100,00$$

$$w_k = 1,00 \rightarrow \text{prema Sec.3 C1004} \quad W_k = 1 + 0,06 \cdot t_k \quad ; t_k = 0$$

$$Z = 104,11 \text{ cm}^3$$

$$Z_{\min} = 15 \text{ cm}^3$$

odabrano
HP 80x7**Accommodation decks**

$$\sigma = 100,00$$

$$Z = 22,93 \text{ cm}^3$$

Recess deck/ weather deck

$$\sigma = 100,00$$

$$Z = 104,02 \text{ cm}^3$$

Deck girder

Sec.9 D100

$$Z=100 \cdot S^2 \cdot b \cdot p \cdot w_k / \sigma$$

$$S=2,73 \text{ m}$$

$$b=8,16 \text{ m}$$

$$p=5,00 \text{ kN/m}^2$$

$$w_k=1,00$$

$$\sigma=100,00$$

$$Z=304,08$$

effective flange of
girders Sec.3 C400

$$C_0=0,00$$

$$C_1=0,38$$

$$C_2=0,67$$

a=	b=	a/b	C=
2730,00	3060,00	0,89	0,25
2730,00	3530,00	0,77	0,20
2730,00	3740,00	0,73	0,19
2730,00	4080,00	0,67	0,16
2730,00	2510,00	1,09	0,41

minimalne debljine elemenata

$$t=5,0+k/\sqrt{f_1}+t_k$$

$$t_k=0,00 \text{ mm}$$

$$k=0,01 \cdot L=2,73$$

$$t=7,73 \text{ mm}$$

$$\text{uzeto } t=10,00 \text{ mm}$$

$$f_1=1,00$$

Zahtijevana površina nakon odbijanja rupa

$$A = 7,80 \text{ cm}^2$$

$$\begin{array}{ll} \text{širina rupe} & A = 17,00 \text{ cm}^2 \\ 200,00 \text{ mm} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{web height} & \text{odabrano} \\ 370,00 \text{ mm} & T 370 \times 10 + 150 \times 10 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} t = & \\ 10,00 \text{ mm} & Z \text{ dobiveno} \\ & Z = 956,31 \text{ cm}^3 \end{array}$$

Sponja Sec.9
 D100

$$Z = 0,63 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k / \sigma$$

$$l = 8,16 \text{ m}$$

$$s = 2,73 \text{ m}$$

$$p = 5,00$$

$$w_k = 1,00$$

$$f_1 = 1,00$$

$$Z = 572,60 \text{ cm}^3$$

minimalne debljine elemenata

$$t = 4,5 + k / \sqrt{f_1} + t_k$$

$$t_k = 0,00$$

$$k = 0,01 \cdot L = 2,73$$

$$t = 7,23$$

$$\text{uzeto } t = 10,00 \text{ mm}$$

Zahtijevana površina nakon odbijanja rupa

A= 7,80 cm²

širina rupe A= 17,00 cm²

200,00 mm

web height odabrano

370,00 mm T 370X10 + 150X10

t=

10,00 mm

Z dobiveno

Z= 956,31 cm³

effective flange of girders Sec.3 C400

a=	b=	a/b	C=		
8160,00	2730,00	2,99	0,84	C0=	0,00
7480,00	2730,00	2,74	0,80	C1=	0,38
7740,00	2730,00	2,84	0,81	C2=	0,67
6120,00	2730,00	2,24	0,71	C3=	0,84
5440,00	2730,00	1,99	0,67		
3400,00	2730,00	1,25	0,45		
2040,00	2730,00	0,75	0,19		
1620,00	2730,00	0,59	0,14		

Sec.7

Side frames

C400

$Z = C \cdot I^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k / f_1$

C= 0,37

s= 2,73 m

wk= 1,00

f1= 1,00

zone	l	Z	p	odabrano	Z odabrano
	m	cm ³	kN/m ²		cm ³
2-6,1	4,10	1609,85	94,75	T 370x12 + 200X15	1650,26
6,1-8,9	2,80	474,47	59,79	T 370x10 + 150X10	956,31
8,9-11,7	2,80	343,21	43,21	T 350x10 + 100X8	651,39
11,7-14,7	3,00	245,65	30,89	T 300x8 + 100X8	462,51
14,7-21,3	2,80	161,84	17,69	T 300x8 + 100X8	462,51
21,3-28,7	4,10	224,11	13,14	T 300x8 + 100X8	462,51
28,7---	2,75	101,37	13,14	T 300x8 + 100X8	462,51

effective flange of girders Sec.3 C400

a=	b=	a/b	C=		
4100,00	2730,00	1,50	0,53	C1=	0,38
3800,00	2730,00	1,39	0,49	C2=	0,67
3300,00	2730,00	1,21	0,44		
3000,00	2730,00	1,10	0,41		
2800,00	2730,00	1,03	0,39		
2750,00	2730,00	1,01	0,38		
1200,00	2730,00	0,44	0,08		

minimalne debljine elemenata

$$t=4,5+k/\sqrt{f_1}+t_k$$

$$t_k=0,00$$

$$k=0,01*L=2,76$$

$$t=7,26$$

$$\text{uzeto } t=7,50 \text{ mm}$$

$$f_1=1,00$$

Koljena Sec.3
C200

$$t_b=(3+k*\sqrt{Z/w_k})/\sqrt{f_1/f_{11}}+t_k$$

$$t_k=0,00$$

$$w_k=1,00$$

$$f_1=1,00$$

$$f_{11}=1,00$$

$$k=0,20$$

koljena sa flanžom

$$a=c*((Z/w_k)/(t_b-t_k))$$

c= 70,00

sa flanžom

hb - nesmije biti manji od visine struka

širina flanže

$$W=45(1+Z/2000) ; \text{ min } 50 \text{ mm}$$

zona	Z	t _b [mm]	t _b odabrano	a [mm]	a odabrabno	h _b [mm]	W [mm]	W odabrano	t _f =t _b
2-6,1	1650,26	11,12	11,00	852,57	855,00	400,00	82,13	85,00	11,00
6,1-8,9	956,31	9,18	9,00	714,27	715,00	400,00	66,52	70,00	9,00
8,9-11,7	651,39	8,10	8,00	627,56	630,00	400,00	59,66	60,00	8,00
11,7- 14,7	462,51	7,30	7,50	557,13	560,00	350,00	55,41	60,00	7,50
14,7----	462,51	7,30	7,50	557,13	560,00	350,00	55,41	60,00	7,50

upore

Sec.13. C100, C200

površina koju upora drži

$$Adk=b*s \quad m^2$$

$$A=0,07*Adk*p \quad cm^2$$

tlak

$$p \quad 5,00 \quad kN/m^2$$

palube	b [m]	s [m]	Adk [m ²]	A [cm ²]
1-7	8,00	2,73	21,84	7,64
8-15	8,00	2,73	21,84	7,64

$$F=p*Adk$$

palube	Adk [m ²]	p	F	
1-7	21,84	5,00	109,20	kN
8-15	21,84	5,00	109,20	kN

$$P=n*F$$

palube	n	F	P	
1-7	6,00	109,20	655,20	kN
8-15	8,00	109,20	873,60	kN

$$P_{tot}=EP \quad kN$$

$$\sigma_{el}=0,001E(IA/AI^2)$$

$$E= \quad 206000,00 \quad N/mm^2$$

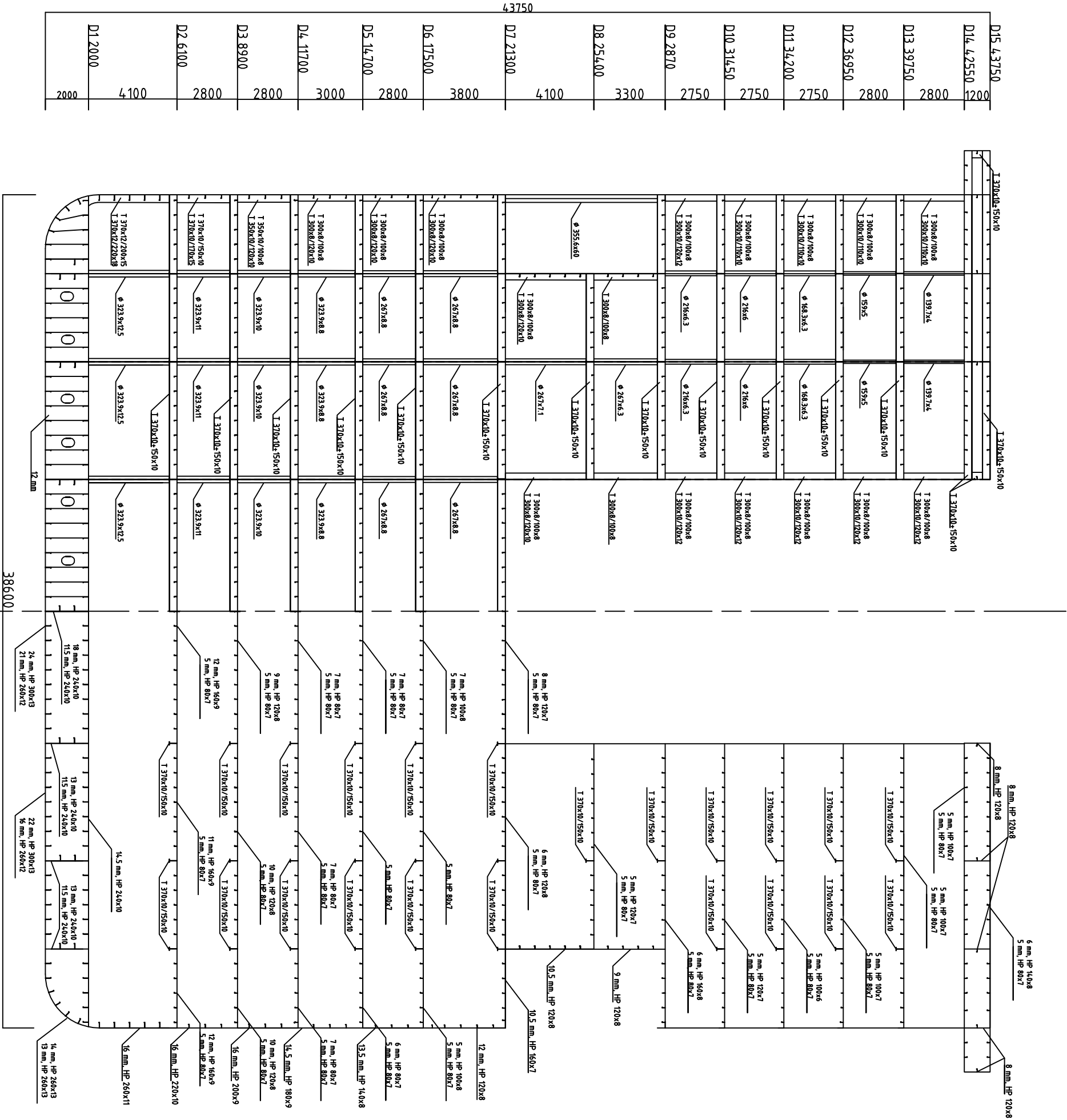
$$\sigma_{el}= \quad N/mm^2$$

$$\sigma_c=\sigma_f(1-\sigma_f/4\sigma_{el}) \text{ kad je } \sigma_{el} > \sigma_f/2$$

z	P=	D	d	l=	A=	l=	k=	i=	n=	σel=	σf=	σc1=	σa=
	kN	cm	cm	cm4	cm2	m				N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2
1-2	1528,80	31,80	28,96	15669,65	135,53	4,10	0,70	10,75	0,51	1416,88	235,00	225,26	222,59
2-3	1419,60	31,80	29,30	14019,42	119,97	2,80	0,70	10,81	0,56	3070,51	235,00	230,50	212,83
3-4	1310,40	31,80	29,30	14019,42	119,97	2,80	0,70	10,81	0,56	3070,51	235,00	230,50	196,46
4-5	1201,20	31,80	29,30	14019,42	119,97	3,00	0,70	10,81	0,55	2674,75	235,00	229,84	182,73
5-6	1092,00	27,30	24,80	8697,45	102,30	2,80	0,70	9,22	0,54	2233,96	235,00	228,82	198,80
6-7	982,80	27,30	24,80	8697,45	102,30	3,80	0,70	9,22	0,50	1212,90	235,00	223,62	193,81
7-8	873,60	26,70	24,50	7260,62	88,47	4,10	0,70	9,06	0,48	1005,75	235,00	221,27	204,91
8-9	764,40	26,70	24,94	5955,46	71,38	3,30	0,70	9,13	0,51	1578,21	235,00	226,25	208,25
9-10	655,20	21,60	19,60	3440,99	64,72	2,75	0,70	7,29	0,51	1448,33	235,00	225,47	199,18
10-11	546,00	21,60	20,00	2831,27	52,28	2,75	0,70	7,36	0,51	1475,30	235,00	225,64	204,96
11-12	436,80	21,60	20,40	2183,85	39,58	2,75	0,70	7,43	0,51	1502,81	235,00	225,81	216,00
12-13	327,60	15,90	14,48	979,35	33,88	2,80	0,70	5,38	0,46	759,49	235,00	216,82	210,06
13-14	218,40	15,90	14,48	979,35	33,88	2,80	0,70	5,38	0,46	759,49	235,00	216,82	140,04
8-10	4368,00	35,56	23,56	63366,31	557,19	7,10	0,70	10,66	0,42	464,73	236,00	206,04	186,55

Prilog B

Nacrti rebara



Legenda

Iznujane vrijednosti

podatke vrijednosti

nepronijane vrijednosti

L = 273 m

B = 38,6 m

T = 7,07 m

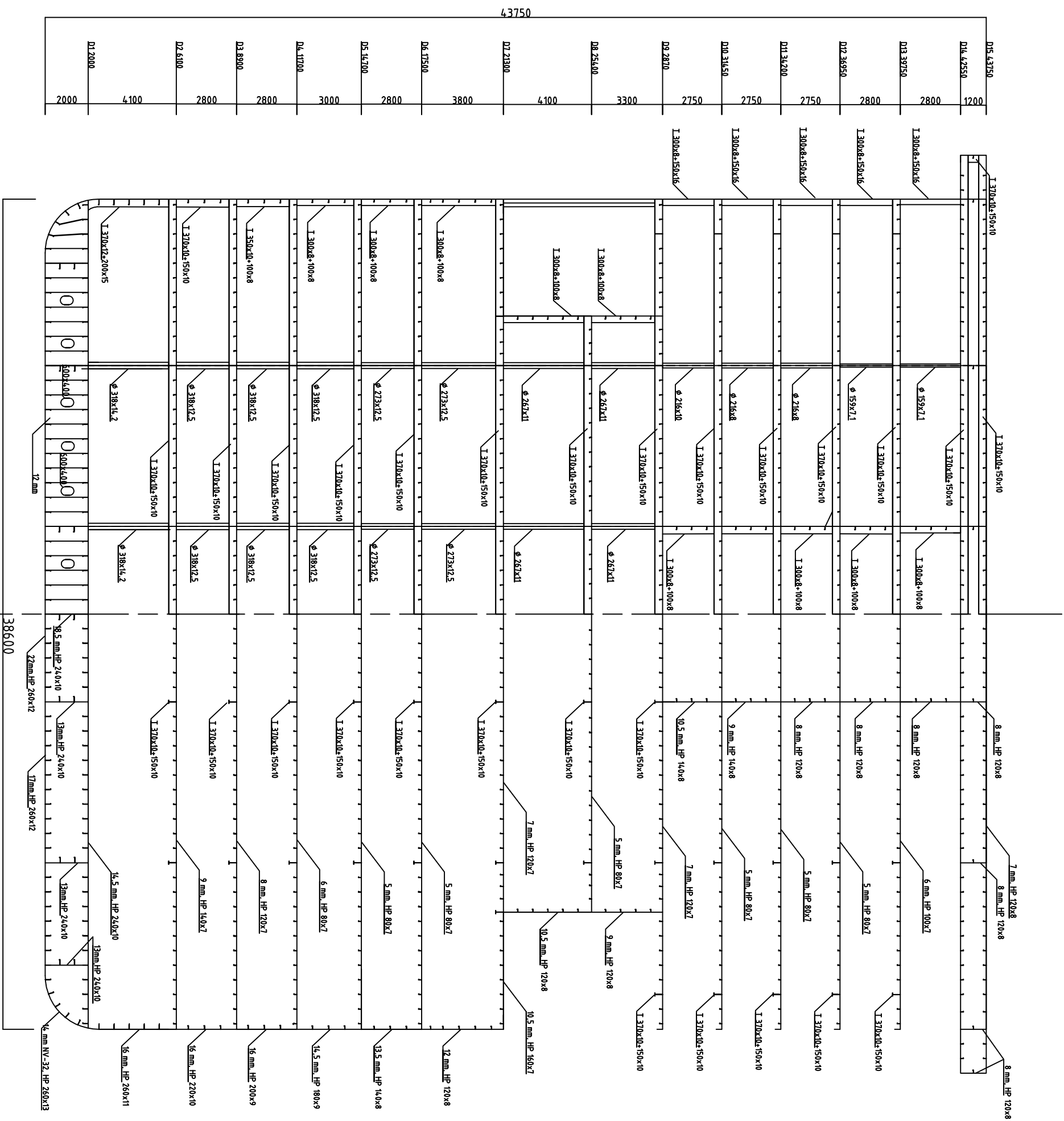
H = 43,75 m

RAZMAK REBRENICA = 2730 mm

RAZMAK UPORA = 2730 mm

RAZMAK UKREPA = 680 mm

DIPLOMSKI RAD				FSB - Zagreb	
	Datum	Potpis	Domagoj Danić		
Projektirao					
Crtao					
Pregledao					
Mjerilo: 1:200	Naziv: POPREČNI PRESJEK GLAVNOG REBRA NOVOG KONCEPTA PUTNIČKOG BRODA				



DIPLOMSKI RAD FSB - Zagreb			
	Datum	Potpis	Domagoj Daničić
Projektitrao			
Crtao			
Pregledao			
Mijeniti: 1.200	Naziv: POPEČNI PRESJEK GLAVNOG REBRA KONVENCIONALNOG KONCEPTA PUTNIČKOG BRODA		